

THÈSE

PRESENTÉE

A L'UNIVERSITE DE BESANÇON
FACULTE DES SCIENCES ET DES TECHNIQUES

POUR OBTENIR

LE DIPLOME DE DOCTEUR EN PHYSIQUE
Mention OPTIQUE

PAR

Abdelouahab MIKOU

Maître ès Sciences Physiques

ETUDE OPTIQUE D'UN CRISTALLIN ARTIFICIEL :
DETERMINATION DES PARAMETRES DE LENTILLES
ET D'UN DOUBLET ACHROMATISE POUR LA CORRECTION
DE L'ŒIL APHAQUE.

SOUTENUE LE OCTOBRE 1980 DEVANT LA COMMISSION D'EXAMEN :

MM. J. Ch. VIÉNOT

Professeur à l'Université de Franche-Comté, Besançon
Directeur du Laboratoire d'Optique

Président

J. ROYER

Professeur à l'Université de Franche-Comté, Besançon
Chef du Service d'Ophtalmologie du C.H.U.

J. BULABOIS

Professeur à l'Université de Franche-Comté, Besançon
Doyen de la Faculté des Sciences et des Techniques
de Besançon

Examinateurs

J. DUVERNOY

Maître de Recherches au C.N.R.S.

THÈSE
UNIVERSITÉ DE GRÈCE
FACULTÉ DES SCIENCES ET DES TECHNOLOGIES
DIPLOME DE DOCTEUR EN PHYSIQUE
Mention OPTIQUE
Digitized by the Internet Archive
in 2026
ANASTASIOS MIKOU
ÉTUDE OPTIQUE D'UN CRISTAL ANISOTROPE
DE DÉTERMINATION DE PARAMÈTRES DE LENTILLE
ET D'UN DOCTEUR ANASTASIOS MIKOU LA GRÈCE

THÈSE

PRESENTÉE

A L'UNIVERSITÉ DE BESANÇON
FACULTE DES SCIENCES ET DES TECHNIQUES

POUR OBTENIR

LE DIPLOME DE DOCTEUR EN PHYSIQUE
Mention OPTIQUE

PAR

Abdelouahab MIKOU

Maître ès Sciences Physiques

ETUDE OPTIQUE D'UN CRISTALLIN ARTIFICIEL :
DETERMINATION DES PARAMETRES DE LENTILLES
ET D'UN DOUBLET ACHROMATISE POUR LA CORRECTION
DE L'ŒIL APHAQUE.

SOUTENUE LE OCTOBRE 1980 DEVANT LA COMMISSION D'EXAMEN :

MM. J. Ch. VIÉNOT

Professeur à l'Université de Franche-Comté, Besançon
Directeur du Laboratoire d'Optique

Président

J. ROYER

Professeur à l'Université de Franche-Comté, Besançon
Chef du Service d'Ophtalmologie du C.H.U.

J. BULABOIS

Professeur à l'Université de Franche-Comté, Besançon
Doyen de la Faculté des Sciences et des Techniques
de Besançon

Examineurs

J. DUVERNOY

Maître de Recherches au C.N.R.S.

THÈSE

PRÉSENTÉE

A L'UNIVERSITÉ DE BESANÇON
FACULTÉ DES SCIENCES ET DES TECHNIQUES

POUR OBTENIR

LE DIPLOME DE DOCTEUR EN PHYSIQUE
Mention OPTIQUE

PAR

Abdelhakim MIKOU

Maître de Sciences Physiques



ETUDE OPTIQUE D'UN CRISTALIN ARTIFICIEL
DETERMINATION DES PARAMETRES DE LENTILLES
ET D'UN DOUBLET ACHROMATISE POUR LA CORRECTION
DE L'OEIL MYOPE

SOUTENUE LE OCTOBRE 1950 DEVANT LA COMMISSION D'EXAMEN :

Président

Professeur à l'Université de Besançon
Faculté des Sciences et des Techniques

MM. J. CH. VIGNOT

J. BOYER

Professeur à l'Université de Besançon
Faculté des Sciences et des Techniques

J. BULABOIS

Professeur à l'Université de Besançon
Faculté des Sciences et des Techniques

Examinateurs

Mme de Balthazar de CHABOIS J. DUBERNY

UNIVERSITÉ DE FRANCHE-COMTÉ BESANÇON

Président : Monsieur le Professeur Pierre LÉVÊQUE

Président honoraire : Monsieur le Professeur Jean THIÉBAUT

FACULTÉ DES SCIENCES ET DES TECHNIQUES

DOYEN

M. le Professeur Jean BULABOIS
Physique Générale-optique

ASSEESSEURS

M. le Professeur Bernard MILLET
Botanique

M. Robert GUYETANT, Maître-Assistant
Biol. animale Ecologie

DOYENS HONORAIRES

MM. GLANGEAUD, JACQUEMAIN, CHATELET,
THIEBAUT, BERNARD

PROFESSEURS HONORAIRES

MM. BENNETON, CHATELET, MESNAGE, QUANTIN
THEOBALD N., THIRY, TRILLAT, TRONCHET,
UEBERSFELD

MM BANTEGNIE Robert	: Mathématiques
BENILAN Philippe	: Mathématiques
BERNARD Jean	: Chimie Physique
BIDAULT Michel	: Taxonomie expérimentale
BROQUET Paul	: Géologie
BRUCKERT Sylvain	: Ecologie végétale
BULABOIS Jean	: Physique Gle optique
CAPODANNO Pierre	: Mecanique théorique
CERUTTI Ernest	: Chimie appliquée
CHALEAT Raymond	: Mécanique appliquée
CHARDON J.Claude	: Spectroscopie
CHAUVE Pierre	: Géologie minéralogie
COUGNARD Jean	: Mathématiques
DEVIN Claude	: Chimie 1er cycle
DOBREMEZ J.François	: Biologie
DUBOUCHET Jacques	: Physiologie végétale
GALATRY Louis	: Physique moléculaire
GAUDEMER Yves	: Biochimie
GIRARDET Claude	: Physique Moléculaire
GOMOT Lucien	: Zoologie-Embryologie
GOUARNE René	: Mathématiques
GRAS Georges	: Mathématiques
GREMILLARD Jean	: Mathématiques
KARCHE J.Paul	: Pétrographie Minéralogie
LALLEMENT Gérard	: Mécanique appliquée
LAUDE Bernard	: Chimie organique
LESAINTE Pierre	: Mathématiques
LHOTE François	: Automatique
MERIGOUX Henri	: Cristallographie et Synthèses minérales

MIELLOU J.Claude	: Analyse numérique
MILLET Bernard	: Botanique
MONTAGNER Hubert	: Psychophysiologie
MOREELS Guy	: Astronomie
OLIVIER Marcel	: Electroniq.quantique
OTYANA Claude	: Mécan. appliquée
PAGETTI Jacques	: Chimie appliquée
PARIZET Jean	: Mathématiques
PLUVINAGE Philippe	: Physique théorique
POTIER Robert	: Physique des sols
RANGHEARD Yves	: Géologie
RIPPLINGER Jean	: Physiologie animale
ROBERT Daniel	: Physique
ROBERT Guy	: Electrochimie
ROBERT Jacques	: Mathématiques
THEOBALD J.Gérard	: Spectroscop. hertzien.
THIEBAUT Jean	: Pétrogr. minéralogie
TREHEL Michel	: Informatique
VERNEAUX Jean	: Zoologie-Embryologie
VIENOT Jean-Charles	: Physique Gle optique
WEIL Michel	: Mathématiques

Responsable des services administratifs :

M. Jean-Marie RUNGE

Avant de présenter ce travail, je tiens à adresser mes remerciements sincères à Monsieur le Professeur VIÉNOT pour le temps qu'il a toujours su me consacrer, malgré ses lourdes charges. La confiance qu'il m'a accordée et ses encouragements constants ont été pour moi un soutien indispensable et je suis heureux de lui témoigner ici ma gratitude.

Monsieur le Professeur J. ROYER m'a consacré une partie de son temps tout au long de ce travail ; ses conseils m'ont permis d'éclaircir un certain nombre de points. Qu'il trouve ici l'expression de ma profonde gratitude.

Monsieur le Professeur J. BULABOIS n'a jamais caché sa sympathie à mon égard et c'est une grande joie pour moi qu'il ait accepté de participer au jugement de cette thèse. Qu'il trouve ici mes vifs remerciements.

Je ne sais comment manifester ma reconnaissance à Monsieur J. DUVERNOY qui tout au long de ce travail, et particulièrement au cours de la rédaction du mémoire, n'a cessé de m'aider en m'apportant ses critiques et ses conseils. Qu'il trouve ici l'expression de mes sincères remerciements.

Je ne saurais oublier l'aide efficace qui m'a été apportée par tout le personnel du Laboratoire, notamment Mesdames C. BAINIER, L. BONNOT, S. JOUFFROY, J. LEPIN et aussi par l'ensemble des chercheurs.

Merci à tous.

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION GENERALE

CHAPITRE 1 - DONNEES GENERALES, DEFINITIONS	3
A - RAPPEL RELATIF A L'ETUDE OPTIQUE DE L'OEIL	3
A - 1. DESCRIPTION OPTIQUE DU GLOBE OCULAIRE	3
A - 1 - 1. FORME DE L'OEIL	3
A - 1 - 2. DIMENSIONS DE L'OEIL	3
A - 2. CHOIX D'UN OEIL SCHEMATIQUE. RAPPEL SUR LE CALCUL DE SES CONSTANTES OPTIQUES	4
A - 2 - 1. L'OEIL SCHEMATIQUE ENVISAGE	4
A - 2 - 2. CALCUL DE SES CONSTANTES OPTIQUES	4
B - L'OEIL APHAQUE. HISTORIQUE SUR LA CORRECTION DE L'OEIL APHAQUE	7
B - 1. DEFAUTS VISUELS DUS A L'ABLATIION DU CRISTALLIN	7
B - 2. RAPPELS SUR LES TRAVAUX ANTERIEURS	8
C - CORRECTION OPTIQUE DE L'OEIL APHAQUE AU MAYEN D'UNE LENTILLE INTRA-OCULAIRE	9
C - 1. PRINCIPALES FORMULES UTILISEES DANS LE CALCUL D'UN CRISTALLIN ARTIFICIEL	10
C - 1 - 1. CALCUL DE LA PUISSANCE APRES EXTRACTION DU CRISTALLIN CATARACTE	10
C - 1 - 2. CALCUL DE LA PUISSANCE AVANT EXTRACTION DU CRISTALLIN CATARACTE	11
CONCLUSION	13
 CHAPITRE II - PRINCIPE DU CALCUL AUTOMATIQUE D'UN CRISTALLIN ARTIFICIEL POUR L'OEIL SCHEMATIQUE ADOPTE	 14
A - TRACE DE LA MARCHE DES RAYONS A TRAVERS L'OEIL	14
A - 1. PRINCIPE	14

A - 2.	FORMULES UTILISEES DANS LA REALISATION DU PROGRAMME DE TRACE DES RAYONS	17
A - 3.	DESCRIPTION DU PROGRAMME	18
A - 4.	PROGRAMME POUR LA DETERMINATION D'UNE GEOMETRIE DE L'OEIL	18
A - 5.	REMARQUES ET RESULTATS OBTENUS	22
B -	RAPPEL DES DIFFERENTES METHODES DE CALCUL AUTOMATIQUE DES COMBINAISONS OPTIQUES	26
B - 1.	METHODES DE BEKER	26
B - 2.	METHODE DE BLACK	27
B - 3.	METHODE DE DONALD FEDER	27
B - 4.	METHODE DE JOSEPH MEIRON	29
B - 5.	METHODE DE ROBERT-E-HOPKINS	31
	CONCLUSION	32
C -	PRINCIPE DE LA METHODE UTILISEE	33
D -	CALCUL D'UNE LENTILLE	34
D - 1.	DETERMINATION DES PARAMETRES INITIAUX	34
D - 2.	DEFINITION ET CALCUL DES TERMES D'ABERRATION	35
D - 2 - 1.	CALCUL DES COEFFICIENTS D'ABERRATION DU TROISIEME ORDRE	36
D - 2 - 1.	CALCUL DES TERMES ADDITIONNELS D'ABERRATION	38
D - 3.	DESCRIPTION DU PROGRAMME DE CALCUL	41
D - 3 - 1.	ORGANIGRAMME	42
D - 3 - 2.	LISTING DU PROGRAMME	43
D - 3 - 3.	DEROULEMENT DU CALCUL	47
D - 4.	DETERMINATION DE L'INTERVALLE DE VARIABILITE DES ACCROISSEMENTS FINIS δx_j CHOIX DE LA SOLUTION FINALE	47
D - 5.	TOLERANCES SUR LA CONSTRUCTION PRATIQUE DE LA LENTILLE	50
D - 6.	REPRESENTATION DE LA TACHE IMAGE SUR LA RETINE FORME DE LA SURFACE IMAGE	51
D - 7.	REMARQUES ET CONCLUSIONS	53

CHAPITRE III - CALCUL D'UN DOUBLET	55
INTRODUCTION	55
A - ETABLISSEMENT DE L'AVANT PROJET	55
A - 1. FORMULATION DE L'EQUATION EXPRIMANT LA CONDITION D'ECHELLE	57
A - 2. FORMULATION DE L'EQUATION EXPRIMANT LA CONDITION D'ACHROMATISME	58
B - TERMES ADDITIONNELLES D'ABERRATION. RESULTATS DU CALCUL OBTENUS PAR LA METHODE DE MOINDRES CARRES	60
B - 1. TERMES ADDITIONNELS D'ABERRATION	60
B - 2. RESULTATS DU CALCUL	64
C - INTERPRETATION DES RESULTATS	66
C - 1. ETENDUE GEOMETRIQUE DE LA TACHE IMAGE. FORME DE LA SURFACE IMAGE	66
C - 2. COURBES D'ABERRATION DE L'OEIL CORRIGE ET DE L'OEIL SCHEMATIQUE	67
CONCLUSION	67
CONCLUSION GENERALE	69
ANNEXE (CALCUL D'UNE LENTILLE ASPHERIQUE)	71
REFERENCES	73

INTRODUCTION GENERALE

Il semble qu'aucune technique ne permette, actuellement, de faire disparaître l'opacité d'un cristallin. Le traitement chirurgical, anciennement connu, consiste à extraire le cristallin cataracté. La compensation de la perte du cristallin doit être assurée par des verres de lunette, ou des verres de contact. Toutefois, un procédé déjà connu qui bénéficie de la logique et des progrès techniques consiste en l'implantation d'un cristallin artificiel après extraction du cristallin cataracté. Cependant, un certain nombre de problèmes se posent notamment dans la détermination des composantes optiques d'un cristallin artificiel.

Plusieurs méthodes de calcul ont été élaborées dans ce but. Le principe d'établissement de ces méthodes repose sur des hypothèses simplificatrices et sur des formules approcimatives de l'optique paraxiale.

Ainsi, ces méthodes ne s'avèrent-elles pas rigoureuses et le cristallin ainsi calculé ne corrige pas totalement l'oeil aphaque ; les défauts résiduels peuvent affecter considérablement l'acuité visuelle.

Dans ce présent travail, on utilise une méthode de calcul automatique qui tient compte de la marche réelle des rayons à travers l'ensemble des dioptries de l'oeil, et précise la qualité de l'image se formant sur la rétine. Le cristallin artificiel, ainsi défini, corrige au mieux l'oeil aphaque. Les aberrations de l'oeil résultant sont fortement atténuées.

Le premier chapitre résume les principales données et définitions générales concernant l'étude optique de l'oeil schématisé envisagé, de l'oeil aphaque et de ses défauts. Enfin, on rappelle brièvement les différentes méthodes de correction optique de l'oeil aphaque.

Dans le deuxième chapitre est exposé le principe du tracé automatique de la marche réelle des rayons à travers l'oeil, quelques méthodes de calcul automatique de combinaison optique sont rappelées. Le principe de la méthode de calcul du cristallin est alors présenté, afin de déterminer une lentille corrigeant l'oeil aphaque. Une étude systématique de la stabilité et de la tolérance des paramètres de construction de la lentille est ensuite détaillée. Enfin, une interprétation des résultats obtenus est proposée à partir de la forme de la tache image rétinienne et de la surface image. Le troisième chapitre

traite le cas d'une correction de l'oeil aphaque à l'aide d'un doublet.

Enfin, les résultats de calcul d'une lentille asphérique sont donnés en annexe. Le travail a été réalisé sur commande par le Centre de Recherche et de Calculs Optiques (CERCO).

Dans le chapitre de conclusion sont résumées les différentes démarches conduisant à des modèles. Des tableaux indiquent les caractéristiques essentielles de deux modèles constitués par des lentilles simples et un modèle de double achromatique.

CHAPITRE I

DONNEES GENERALES, DEFINITIONS

I.A RAPPEL RELATIF A L'ETUDE OPTIQUE DE L'OEIL

A.1 DESCRIPTION OPTIQUE DU GLOBE OCULAIRE.

L'oeil est l'organe de la vision, il constitue un système optique convergent. Grâce à ce système équivalent à un dioptre sphérique, l'image d'un objet se forme sur la rétine.

L'oeil comporte une succession de dioptres ; la lumière traverse d'abord : le dioptre cornéen antérieur, le plus puissant, puis le dioptre cornéen postérieur, de faible puissance, séparant des milieux d'indices de réfraction très voisins (la cornée et l'humeur aqueuse), le dioptre cristallinien antérieur et enfin le dioptre cristallinien postérieur. Les surfaces de séparation de ces divers dioptres sont en fait imparfaitement sphériques ; de plus les différents dioptres ne constituent qu'un système optique approximativement centré.

A.1.1 Forme de l'oeil

L'oeil ne présente pas une forme géométrique bien définie, mais il est souvent commode de décrire l'oeil humain de l'adulte comme une sphère de 12 millimètres de rayon (en moyenne) complétée vers l'avant par un hublot transparent plus bombé, fragment d'une sphère de 8 millimètres de rayon, dont l'axe géométrique traverse la surface extérieure de l'oeil au pôle antérieur et au pôle postérieur.

En fait la forme du globe est déterminée par la résistance que sa paroi offre à l'accroissement des régions antérieures et en particulier du corps vitré. La partie postérieure de l'oeil est un peu aplatie, et la partie antérieure prend un aspect légèrement conique.

A.1.2 Dimensions de l'oeil

Les dimensions de l'oeil humain varient beaucoup d'un sujet à l'autre. Cependant il est fort utile de connaître les dimensions moyennes.

Le diamètre antéro-postérieur de l'oeil est de 24,3 millimètres environ, l'axe transversal de 24,1 et l'axe vertical de 23,4 millimètres.

Les figures I.1.a et I.1.b représentent des coupes horizontales de l'oeil et du cristallin.

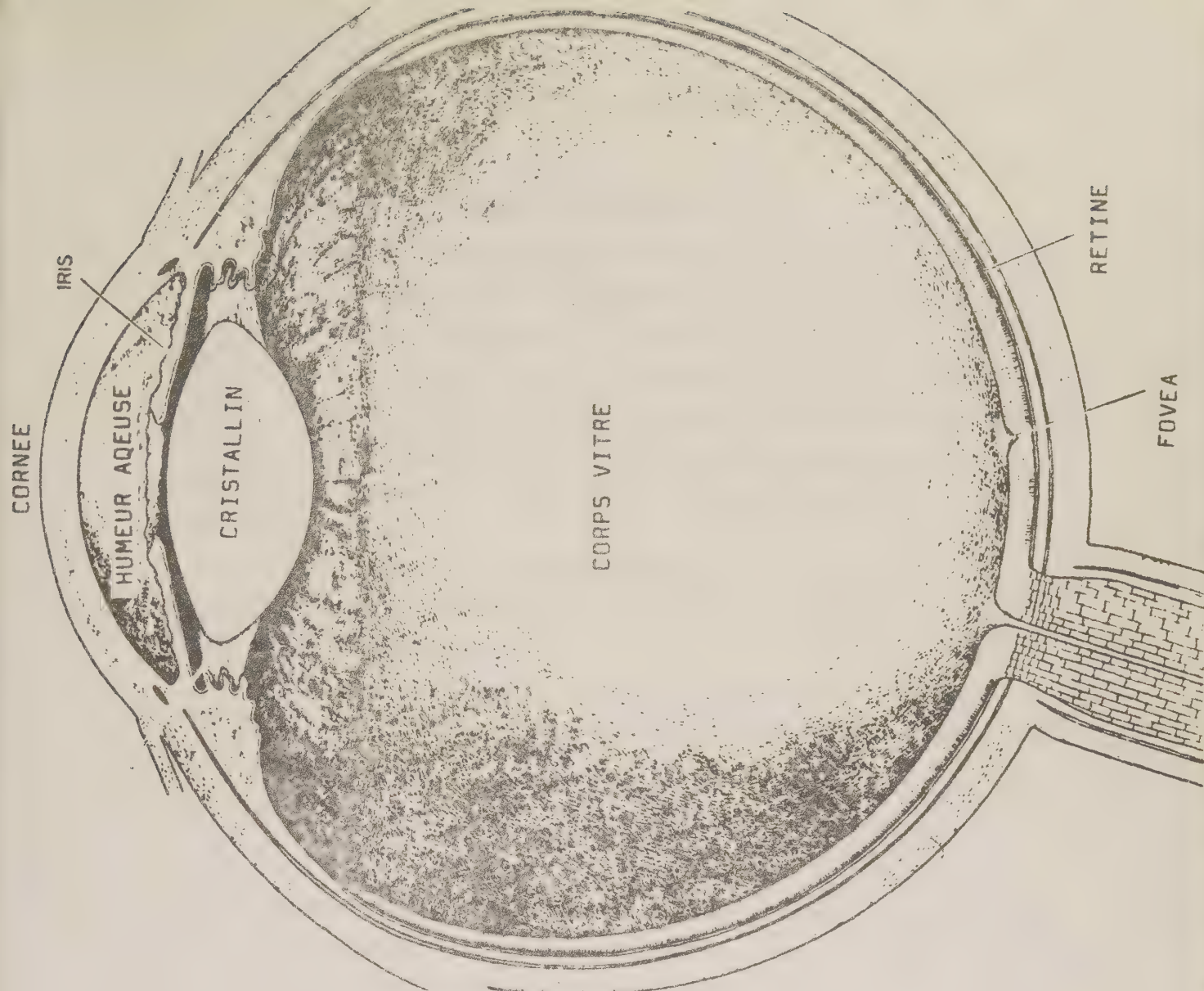
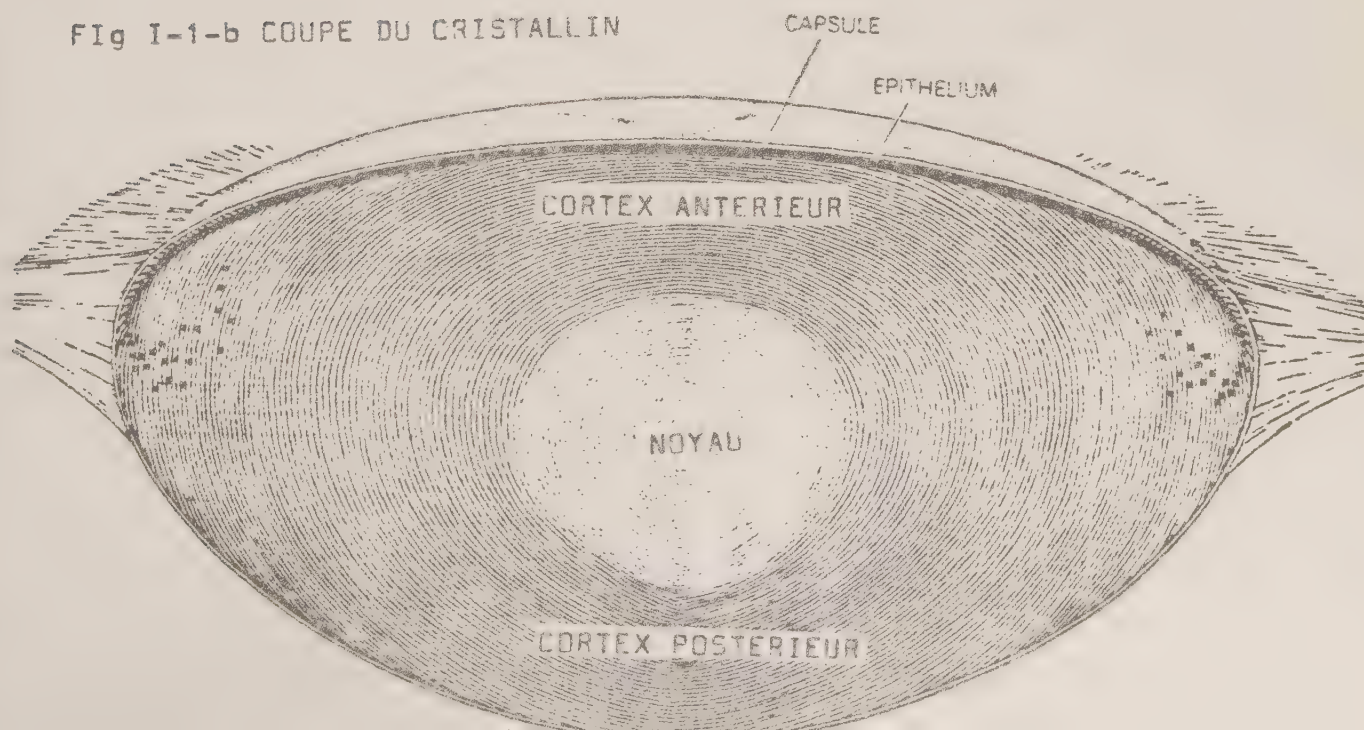


Fig I-1-a COUPE HORIZONTAL DE L'OEIL HUMAIN

Fig I-1-b COUPE DU CRISTALLIN



A.2 CHOIX D'UN OEIL SCHEMATIQUE, RAPPEL SUR LE CALCUL DE SES CONSTANTES OPTIQUES

A.2.1 L'oeil schématique envisagé

Depuis l'établissement des lois de formation des images, de nombreux calculs d'oeil schématique ont été proposés. MOSER (1844), a le premier suggéré un oeil schématique dont le cristallin aurait pour valeur moyenne l'indice 1,384 ; ce qui donne un foyer image de l'oeil loin derrière la rétine. Cette difficulté a été résolue par LISTING¹ qui a calculé un oeil schématique amélioré, adapté ensuite, avec quelques modifications par HELMHOLTZ², GULLSTRAND³ et LE GRAND⁴. De nombreux autres schémas ont été calculés depuis.

Le tableau I donne les valeurs numériques des éléments de construction de quelques yeux schématiques connus. Ces valeurs sont calculées pour un oeil non-accommodé.

L'oeil schématique à adopter dans le présent travail est celui calculé par Yves LE GRAND. Les valeurs proposées sont issues de données statistiques récentes.

A.2.2 CALCUL DE SES CONSTANTES OPTIQUES.

L'oeil humain présente au moins 8 surfaces de discontinuité d'indices : 2 pour la cornée et 6 pour le cristallin. Ces surfaces ne possèdent pas un axe de symétrie commun : la cornée est rarement de révolution, même dans la zone optique (courbures variables d'un méridien à l'autre) et le cristallin est dans le même cas, sans doute. Pour surmonter ces difficultés, on suppose que les différentes surfaces optiques de l'oeil sont des portions de sphères, considérées de révolution autour d'un axe commun qui est l'axe optique, et que les différentes humeurs ainsi que le cristallin sont homogènes. Ainsi peut-on considérer l'oeil comme un système centré ; c'est le cas de l'oeil schématique adopté.

Pour calculer les constantes optiques des différents dioptries de l'oeil schématique, on applique les formules classiques de l'optique géométrique paraxiale.

Constantes optiques de la lentille cornéenne.

a - Puissance de la face antérieure de la cornée :

$$D_{c1} = \frac{n_2 - n_1}{r_1} = \frac{1,3771 - 1}{7,8 \cdot 10^{-3}} = 48,35 \text{ dpt}$$

b - Puissance de la face postérieure de la cornée :

$$D_{c2} = \frac{n_3 - n_2}{r_2} = \frac{1,3374 - 1,3771}{6,5 \cdot 10^{-3}} = - 6,11 \text{ dpt}$$

TABLEAU I

Oeil Schématique Eléments de construction	Yves Le Grand	Gullstand	Listing	Helmholtz
INDICE DE REFRACTION				
Cornée.....	1,3771	1,376	1,337	1,336
Humeur aqueuse.....	1,3374	1,336		
Cristallin (indice total).....	1,42	1,4085	1,454	1,44
Corps vitré.....	1,336	1,336	1,336	1,336
RAYONS DE COURBURE (en mm)				
Surface antérieure de la cornée.....	7,8	7,7	8	8
Surface postérieure de la cornée....	6,5	6,8		
Surface antérieure du cristallin....	10,2	10	10	10
Surface postérieure du cristallin...	-6	-6	-6	-6
ABSCISSE PAR RAPPORT AU SOMMET DE LA SURFACE ANTERIEURE DE LA CORNEE (en mm)				
Surface postérieure de la cornée.....	0,55	0,5		
Surface antérieure du cristallin....	3,6	3,6	4	3,6
Surface postérieure du cristallin...	7,6	7,2	8	7,2

ELEMENTS DE CONSTRUCTION DE L'OEIL SCHEMATIQUE

c - Puissance de la lentille cornéenne :

$$D_c = D_{c1} + D_{c2} - \frac{e1}{n2} \cdot D_{c1} \cdot D_{c2}$$

e1. étant la distance entre la face antérieure et la face postérieure de la cornée.

$$D_c = 48,35 - 6,11 + \frac{0,55 \cdot 10^{-3}}{1,3771} \times 6,11 \times 48,35 = 42,36 \text{ dpt}$$

d - Position du plan principal objet de la lentille cornéenne :

$$\begin{aligned} \overline{S_1 H_c} &= n1 \cdot \frac{e1}{n2} \cdot \frac{D_{c2}}{D_c} \\ &= 1 \times \frac{0,55 \cdot 10^{-3}}{1,3771} \times \frac{(-6,11)}{42,36} = -5,76 \cdot 10^{-5} m \end{aligned}$$

e - Position du plan principal image de la cornée :

$$\begin{aligned} \overline{S_2 F'_c} &= -n3 \cdot \frac{e1}{n2} \cdot \frac{D_{c1}}{D_c} \\ &= -1,3374 \times \frac{0,55 \cdot 10^{-3}}{1,3771} \cdot \frac{48,35}{42,36} = -6,10 \cdot 10^{-4} m \end{aligned}$$

f - Longueur focale objet :

$$\overline{H_c F_c} = -\frac{n1}{D_c} = -23,61 \text{ mm}$$

g - Longueur focale image :

$$\overline{H'_c F'_c} = \frac{n3}{D_c} = \frac{1,3374}{42,36} = 31,57 \text{ mm}$$

Le schéma optique de la lentille cornéenne est donné fig. I.2

Constantes optiques de la lentille cristallinienne.

a - Puissance de la face antérieure :

$$D_{k1} = \frac{n4 - n3}{r3} = \frac{1,42 - 1,3374}{10,2 \cdot 10^{-3}} = 8,10 \text{ dpt}$$

b - Puissance de la face postérieure :

$$D_{K2} = \frac{n5 - n4}{r4} = \frac{1,336 - 1,42}{-6 \cdot 10^{-3}} = 14 \text{ dpt}$$

c - Puissance totale du cristallin :

$$D_K = D_{K1} + D_{K2} - \frac{e^3}{n^4} D_{K1} \cdot D_{K2}$$

$$= 8,10 + 14 - \frac{4 \cdot 10^{-3}}{1,42} \cdot 8,10 \times 14 = 21,78 \text{ dpt}$$

d - Position du plan principal objet :

$$S_3^{H_K} = n^3 \cdot \frac{e^3}{n^4} \cdot \frac{D_{K2}}{D_K} = 1,3374 \cdot \frac{0,004}{1,42} \cdot \frac{14}{21,78} = 2,42 \text{ mm}$$

e - Position du plan principal image :

$$S_4^{H'_K} = -n^5 \cdot \frac{e^3}{n^4} \cdot \frac{D_{K1}}{D_K} = -1,336 \cdot \frac{0,004}{1,42} \cdot \frac{8,10}{21,78} = -1,39$$

f - Longueur focale objet :

$$\overline{H_K F_K} = -\frac{n^3}{D_K} = -\frac{1,3374}{21,78} = -61,40 \text{ mm}$$

g - Longueur focale image :

$$\overline{H'_K F'_K} = \frac{n^5}{D_K} = \frac{1,336}{21,78} = 61,34 \text{ mm}$$

Le schéma optique de la lentille cristallinienne est donné fig. I.3

Constantes optiques de l'oeil schématique complet.

L'association de la lentille cornéenne et de la lentille cristallinienne constitue l'oeil schématique adopté. En appliquant les formules d'association des lentilles on calcule les constantes optiques de l'oeil schématique :

a - Puissance totale de l'oeil schématique ;

$$D_o = D_c + D_K - \frac{H'_c H_K}{n^3} \cdot D_c \times D_K$$

$$= 42,36 + 21,78 - \frac{4,55 \cdot 10^{-3}}{1,3374} \times 42,36 \times 21,78$$

$$D_o = 59,94 \text{ dpt}$$

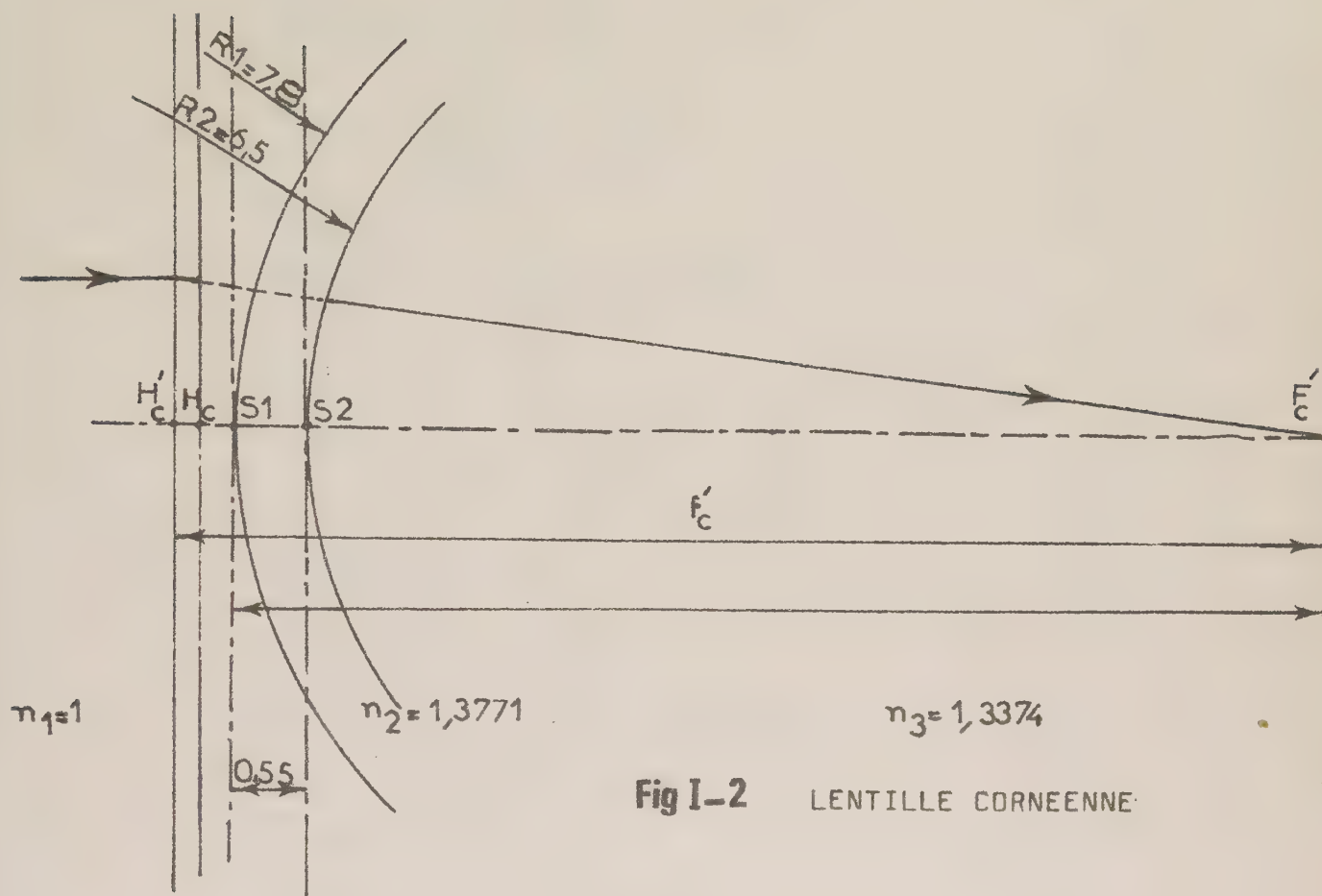


Fig I-2 LENTILLE CORNEENNE

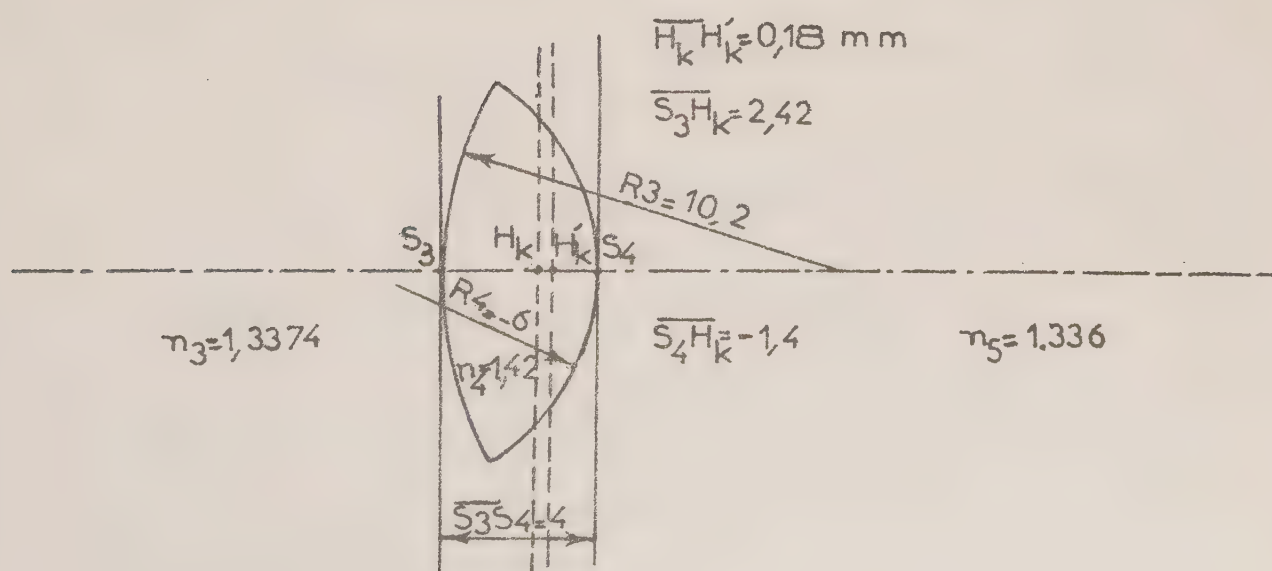


Fig I-3 LENTILLE CRISTALLINIENNE

b - Position du plan principal objet ;

$$\begin{aligned}\overline{H'_C H_O} &= n_1 \times \frac{\overline{H'_C H_K}}{n_3} \cdot \frac{D_K}{D_O} \\ &= 1 \times \frac{4,55 \cdot 10^{-3}}{1,3374} \cdot \frac{21,78}{59,94} \\ \overline{H'_C H_O} &= 1,65 \text{ mm}\end{aligned}$$

c - Position du plan principal image ;

$$\begin{aligned}\overline{H'_K H'_O} &= -n_5 \cdot \frac{\overline{H'_C H_K}}{n_3} \cdot \frac{D_C}{D_O} \\ &= -1,336 \times \frac{4,55 \cdot 10^{-3}}{1,3374} \cdot \frac{42,36}{59,94} \\ \overline{H'_K H'_O} &= -4,92 \text{ mm}\end{aligned}$$

d - Longueur focale objet ;

$$\overline{H_O F_O} = -\frac{n_1}{D_O} = -\frac{1}{59,94} = -16,68 \text{ mm}$$

e - Longueur focale image ;

$$\overline{H'_O F'_O} = \frac{n_5}{D_O} = \frac{1,336}{59,94} = 22,28 \text{ mm}$$

Le tracé de l'oeil schématique avec ses éléments cardinaux est donné Fig. I.4.

Dans le tableau II on présente les valeurs des constantes optiques de quelques yeux schématiques connus.

1.B L'OEIL APHAQUE. HISTORIQUE SUR LA CORRECTION OPTIQUE DE L'OEIL APHAQUE

B.1 DEFECTS VISUELS DUS À L'ABLATION DU CRISTALLIN

L'oeil privé de cristallin est dit aphaque, il est réduit à sa cornée de puissance D_C , dont les points principaux sont sensiblement confondus avec le sommet cornéen ; c'est un cas évident d'amétropie de puissance.

Si l'oeil était émmétrope avant l'ablation du cristallin, il devient fortement hyperope et, par suite, le foyer image de l'oeil se trouve à 31,5 millimètres de la cornée (cas de l'oeil schématique), soit 8 millimètres derrière la rétine ; en conséquence un point éloigné donne une image très floue, et un point approché plus floue encore. (Fig. I.5).



FigI-4 OEIL SCHEMATIQUE

TABLEAU II

Puissance	Yves Le Grand	Gullstrand	Listing	Helmholtz
Surface antérieure de la cornée (en dpt).....	48,35	48,33	42,12	42
Surface postérieure de la cornée (en dpt).....	-6,11	-5,88		
Surface antérieure du cristallin (en dpt).....	8,10	5	11,7	10,4
Surface postérieure du cristallin (en dpt).....	14	8,33	19,5	17,33
CORNEE				
Puissance (en dpt).....	42,36	43,055	42,12	42
Position du point principal objet (en mm).....	-0,06	-0,0496	-0,046	-0,050
Position du point principal image (en mm).....	-0,06	-0,0506	-0,0507	-0,059
Longueur focale objet (en mm)....	-23,61	-23,227	-23,74	-23,8
Longueur focale image (en mm)....	31,57	31,031	31,71	31,80
CRISTALLIN				
Puissance (en dpt).....	21,78	19,11	30,57	27,27
Position du point principal objet (en mm).....	6,02	5,678	5,82	5,73
Position du point principal image (en mm).....	6,29	5,807	5,91	5,87
Longueur focale objet (en mm)....	-61,46	-69,908	-43,37	-49
Longueur focale image (en mm)....	61,34	69,908	43,37	49
OEIL COMPLET				
Puissance (en dpt).....	59,94	58,636	61,45	60,38
Position du point principal objet (en mm).....	1,59	1,348	1,45	1,50
Position du point principal image (en mm).....	1,91	1,602	1,83	1,76
Position du foyer objet (en mm)..	-15,09	-15,707	-15,601	-15,55
Position du foyer image (en mm)..	24,20	24,387	24,4	24,31
Longueur focale objet (en mm)....	-16,68	-17,055	-16,9	-16,81
Longueur focale image (en mm)....	22,28	22,768	22,42	22,56

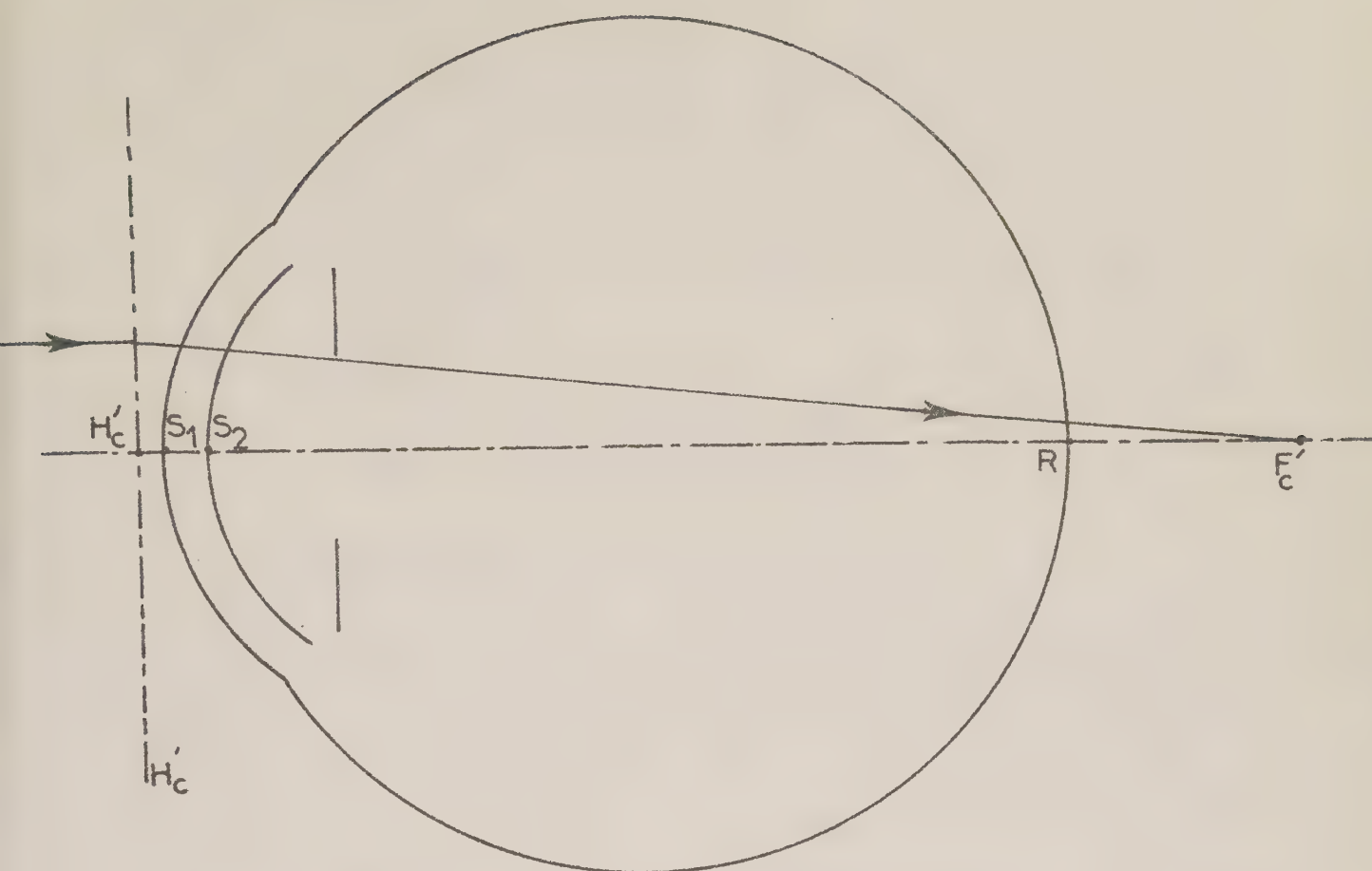


Fig I-5 Marche d'un rayon provenant d'un point à l'infini à travers l'œil aphaque

L'opération de la cataracte (l'ablation du cristallin), entraîne de nombreuses et importantes modifications de la réfraction de l'oeil, ce qui nécessite dans la très grande majorité des cas un appareillage optique pour compenser la perte du cristallin. Avant d'envisager la correction optique de l'aphaquerie, il importe de rappeler les perturbations visuelles d'un oeil aphaque :

- 1 - Si l'oeil était emmétrope une hypermétropie forte apparaît.
- 2 - L'acte opératoire du cristallin peut avoir occasionné un astigmatisme.
- 3 - La perte de l'accommodation et l'hypersensibilité aux rayons ultra-violet, accroissent l'inconfort visuel.
- 4 - L'image rétinienne est très agrandie.

B.2 RAPPELS SUR LES TRAVAUX ANTERIEURS

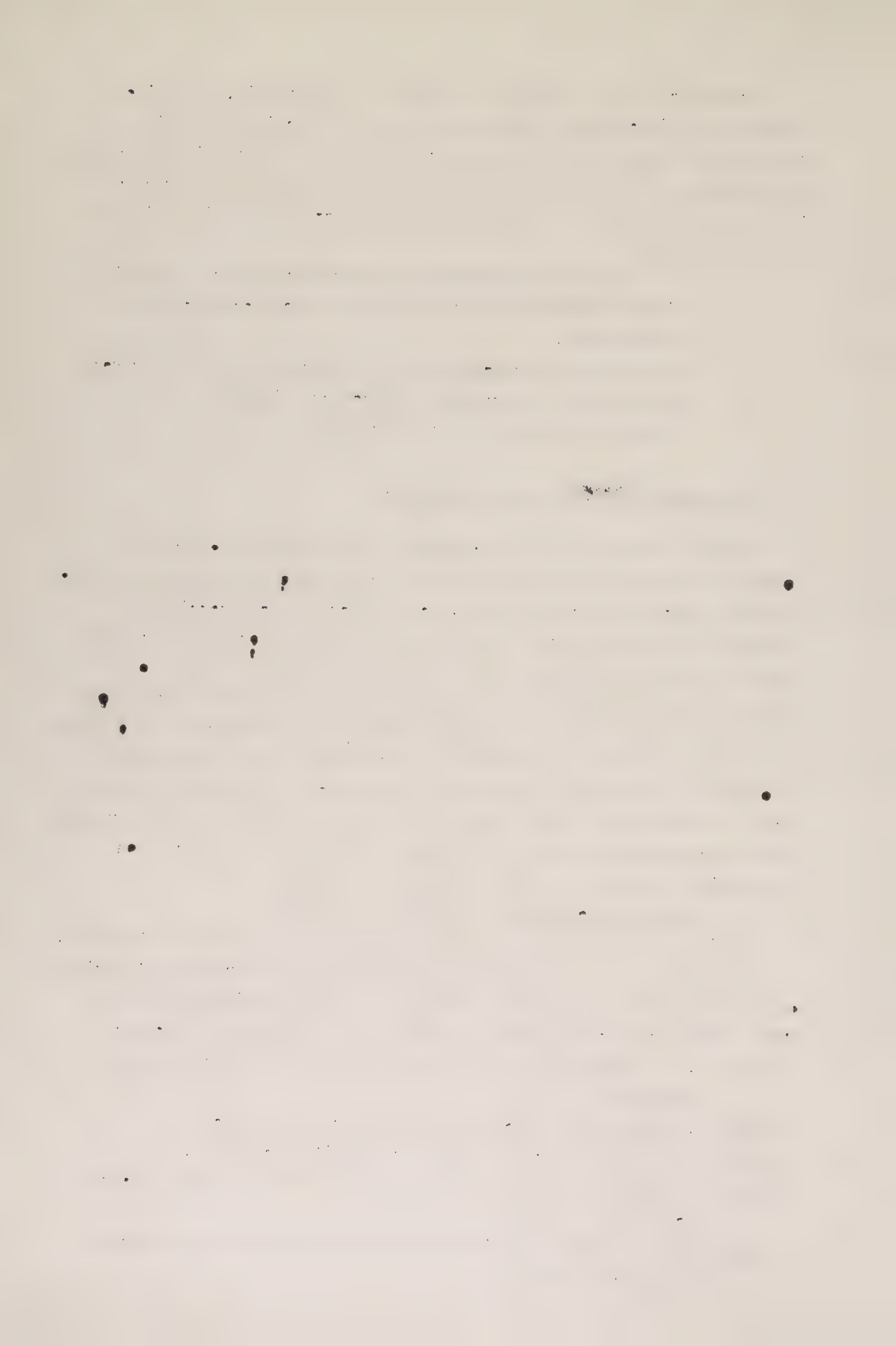
Depuis le 14ème siècle, les opticiens et les médecins ont tenté de corriger les défauts que peut présenter l'oeil aphaque, suivant les moyens dont ils disposaient pour l'époque. Tout d'abord ils ont corrigé ces défauts à l'aide des verres de lunettes : des verres correcteurs taillés dans des calottes sphériques ont été les premiers utilisés. Les moyens d'investigation nouveaux leur ont permis de déceler d'autres verres possédant deux plans de symétrie (sphéro-cylindriques, cylindriques, toriques), et de mettre au point des systèmes plus compliqués, tels ceux destinés à compenser l'anisétropie (variation de dimension ou de forme des images entre les deux yeux) ; plus tard l'idée de remplacer les verres de lunettes par des prothèses de contact est apparue (des lentilles en verre, ou en plastique, placées en contact direct avec l'oeil).

- Rappel historique des prothèses de contact :

Les jalons historiques suivants sont extraits de la thèse de HOURNAU.⁶

Si LEONARD de VINCI, DESCARTES, YOUNG avaient déjà pressenti le principe de correction par verre de contact, il faudra attendre la fin du 19ème siècle pour voir la première réalisation de prothèse de contact :

- 1887 : F. G. MULLER réalise le premier un verre de contact purement prothétique.
- 1888 : E. FLECK tente des corrections par verre de contact.
- 1888 : E. KALT met au point la première lentille cornéenne.
- 1889 : A. MULLER de KIEHL fait fabriquer des verres de contact pour sa myopie de - 14 dpt.
- 1936 : L'I. G. FAREN industrie fabrique les premiers verres scléreux en matière plastique.



- 1938 : OBRIG introduit un verre scléral moulé en polymétacrylate de méthyl.
- 1938 : DU CHANE expérimente un verre en plexiglas.
- 1945 : TOUHY propose la première lentille en matière plastique.
- 1951-1954 : DICKINSON (Angleterre), NELL (USA), SOHNES (Allemagne) ;
mettent au point des microlentilles (9,5 mm de diamètre)
qui sont plus légères et plus minces.
- 1955 : NORMAN BIER présente une lentille cornéenne multicourbes.
- 1964 : O. WICHTERLE met au point des lentilles souples, en matière
hydrophile-Geltack.

En 1949 RIEDLEY⁷ procéda à une correction de l'oeil aphaque en tentant, le premier une implantation intra-oculaire d'un cristallin artificiel chez l'homme. Sa lentille artificielle est implantée dans la chambre postérieure de l'oeil.

De nombreux auteurs ont repris cette technique, mais des complications oculaires sévères, la firent abandonner quelques années plus tard.

Les lentilles placées dans la chambre antérieure suppriment une partie de ces complications.

- STRAMPELLI⁸ : le premier à proposer un modèle de lentille en matière acrylique.

De nombreux auteurs là encore modifièrent le modèle : dans la forme du support, et dans sa consistance.

- COPELAND⁹ propose une lentille en croix de malte, fixée dans le plan de l'iris.

- BINKHORST¹⁰ propose un implant fixé au diaphragme .

- WILSON¹¹ propose un cristallin artificiel à fixation irienne.

On assiste à un constant perfectionnement.

I.C CORRECTION OPTIQUE DE L'OEIL APHAQUE AU MOYEN D'UNE LENTILLE INTRA-OCULAIRE

La correction optique de l'oeil aphaque par lentille intra-oculaire est préférée aux corrections par verres de lunettes ou de contact, pour le confort visuel qu'elle apporte. En effet plus le système optique compensateur se rapproche de l'emplacement normal du cristallin, plus le vice de refraction est atténué. L'idéal est de placer la correction à la place même du cristallin cataracté, c'est ce que réalise le cristallin artificiel. Ainsi avec une telle correction l'oeil est immédiatement et définitivement corrigé (mais de manière fixe). Ceci demande une évaluation de la puissance de la lentille intra-oculaire qui remplace le cristallin cataracté, afin d'obtenir une emmétropisation de l'oeil après implantation de la lentille. Plusieurs formules ont été calculées dans ce but par divers

auteurs, dans cette partie on rappelle brièvement ces différentes formules.

C.1 PRINCIPALES FORMULES UTILISEES DANS LE CALCUL D'UN CRISTALLIN ARTIFICIEL

L'évaluation du pouvoir réfringent de la lentille intra-oculaire se fait suivant le mode d'implantation de la lentille ; ainsi il existe deux cas possibles :

C.1.1 Calcul de la puissance après extraction du cristallin emmetropisé

L'implantation de la lentille peut prendre place plus tard, après extraction du cristallin artificiel, dans ce cas, il faut :

- a - Déterminer la puissance D_c de la cornée par kératométrie ;
- b - Estimer la position de la lentille artificielle à l'intérieur de l'oeil ;
- c - Déterminer le pouvoir de réfraction F_A de verres de lunettes auxiliaires ;
- d - Mesurer la longueur axiale de l'oeil par ultrasonographie.

A l'aide de ces données on peut déterminer la puissance de la lentille artificielle qui aboutit à une emmetropisation de l'oeil en appliquant les formules d'effectivités⁴ sur le système optique : verres auxiliaire + oeil équipé d'un cristallin artificiel.

- Principe de calcul :

On suppose que la cornée est réduite à sa surface antérieure, et l'oeil plus les verres auxiliaires constituent un ensemble de dioptries séparés par des milieux d'indices n_i et d'intervalles d_i (Fig. I.6).

. Formules d'effectivités :

$$X'_i = X_i + Fi$$

$$\frac{1}{X_{i+1}} = \frac{1}{X'_i} - \frac{d_i}{n_{i+1}}$$

avec :

X'_i : vergence image du dioptre (i)

X_i : vergence objet du dioptre (i)

Fi : puissance du dioptre (i)

n_{i+1} : indice de réfraction du milieu ($i+1$)

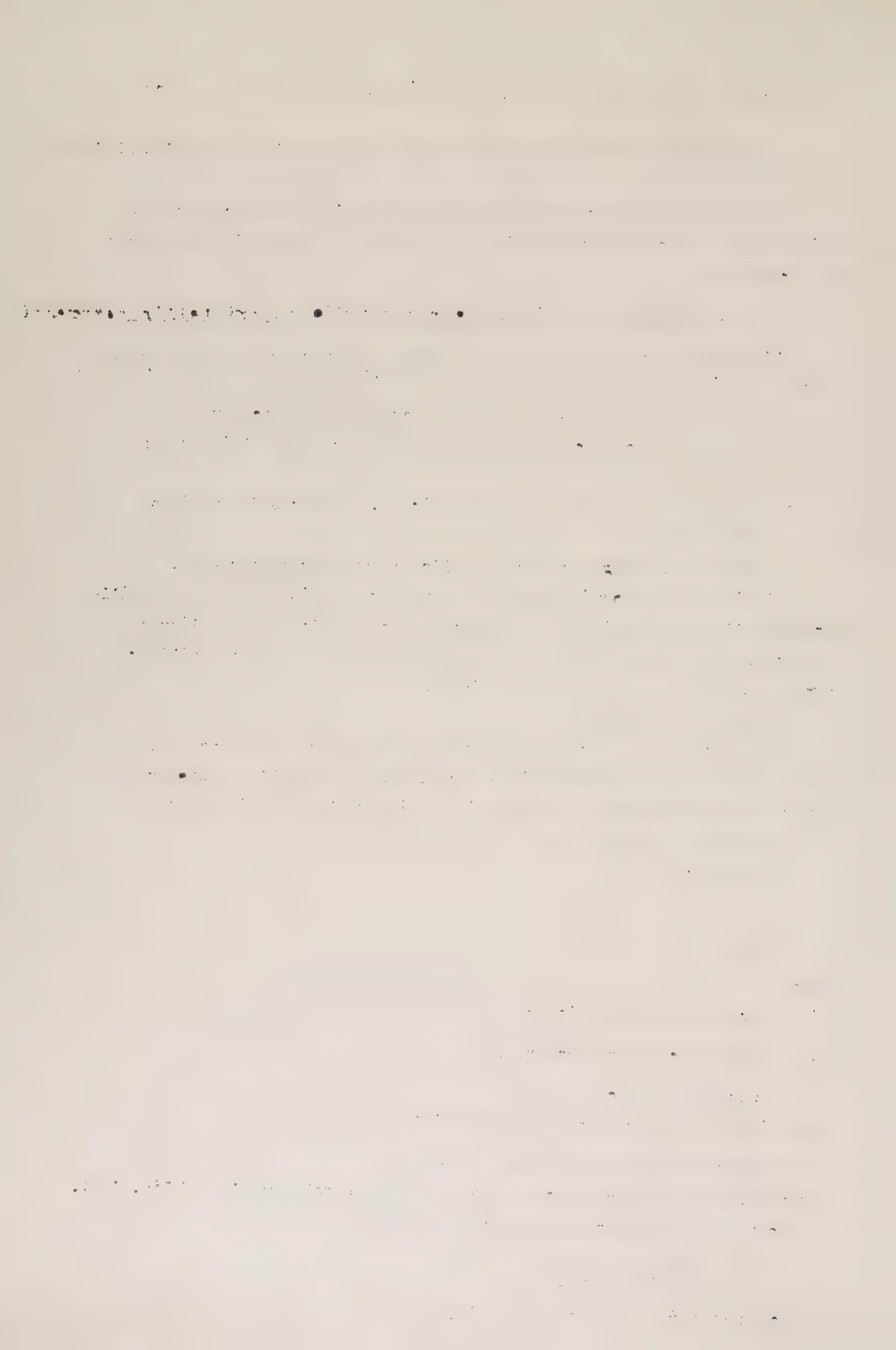
d_i : intervalle entre le dioptre (i) et ($i+1$)

Les résultats des calculs sont présentés dans le tableau III (cf Fig. I.6).

Pour que l'image soit sur la rétine il faut :

$$X'_5 = \frac{n_6}{d_5} = \frac{n_6}{l - (d_3 + d_4)}$$

l : longueur axiale de l'oeil (en mètres).



T A B L E A U I I I

Surface de réfraction	Vergence objet	Vergence image
S_1	$X_1 = 0$	$X_1' = F_1$
S_2	$X_2 = 1/(1/F_1 - d_1/n_2)$	$X_2' = 1/(1/F_1 - d_1/n_2) + F_2 = F_A$
S_3	$X_3 = 1/(1/F_A - d_2/n_3) = F_A'$	$X_3' = F_A' + D = F_C'$
S_4	$X_4 = 1/(1/F_C' - d_3/n_4)$	$X_4' = 1/(1/F_C' - d_3/n_4) + F_4$
S_5	$X_5 = \frac{1/[1/(1/F_C' - d_3/n_4) + F_4] - d_4/n_5}{1}$	$X_5' = X_5 + F_5$

Ainsi la puissance de la face arrière du cristallin artificiel est donnée par :

$$F_5 = \frac{n_6}{1 - (d_3 + d_4)} - \frac{1}{\frac{1}{\frac{1}{1 - d_3} + F_4} - \frac{d_4}{n_5}}$$

Si on choisit arbitrairement le rayon de courbure r_1^p de la face avant du cristallin artificiel, alors F_4 sera égale à :

$$F_4 = \frac{n_5 - n_4}{r_1^p}$$

Et la puissance totale D_k^p du cristallin artificiel sera donnée par :

$$D_k^p = F_4 + F_5 - \frac{d_4}{n_5} \cdot F_4 \cdot F_5$$

Remarquons que ce calcul est très long à effectuer, et qu'on peut déterminer la puissance de la lentille artificielle par la formule proposée par Yves LEGRAND⁴ :

$$D_k^p = \frac{R}{\left(1 - \frac{v}{n}\right) \left[1 - \frac{v}{n} (R + D_c)\right]}$$

ou

R : Réfraction de l'oeil

v : Distance entre le sommet cornéen et la position de la face avant de la lentille artificielle.

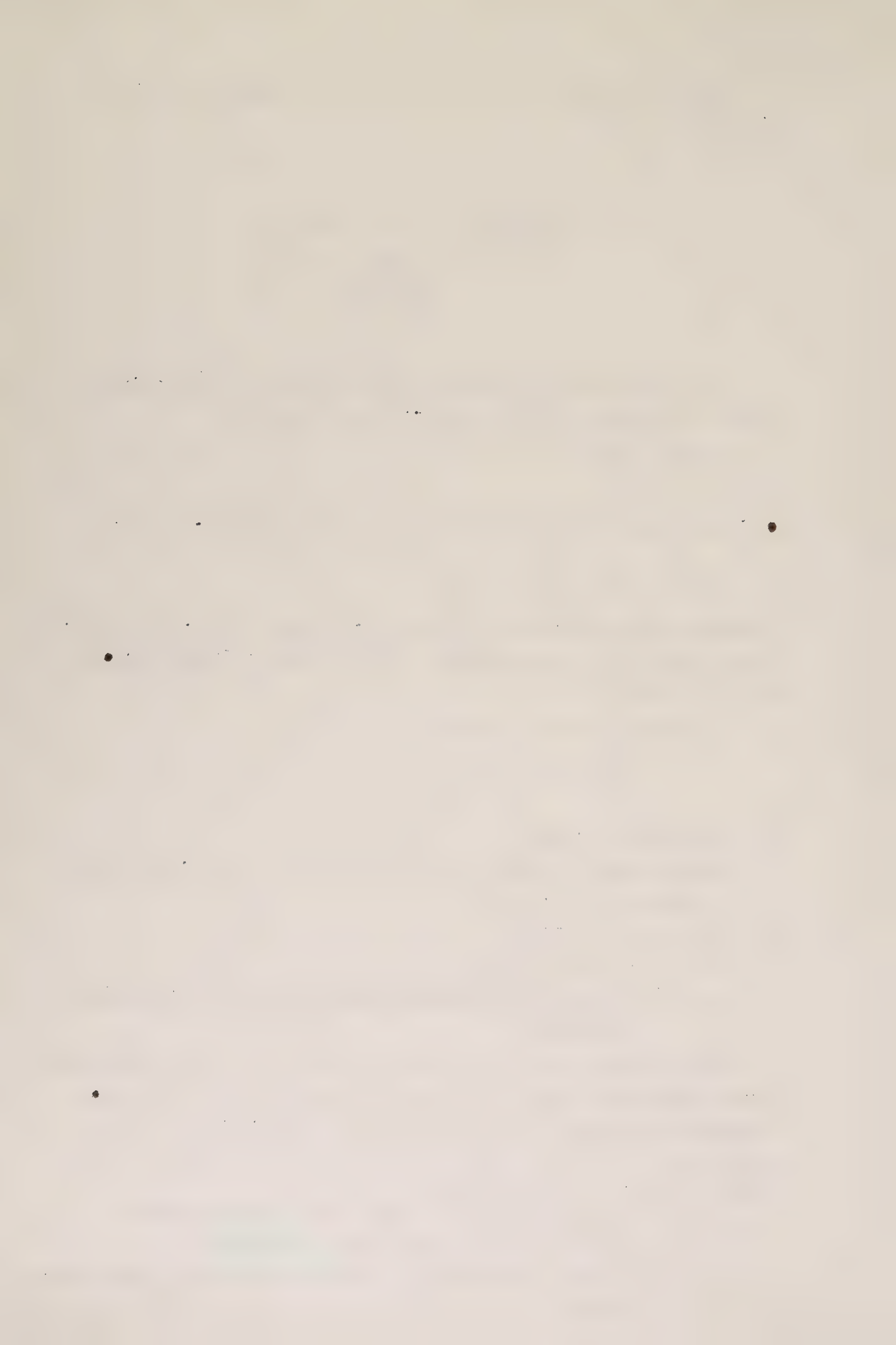
D_c : puissance de la cornée

n : indice de l'humeur aqueuse.

C.1.2 Calcul de la puissance ayant extraction du cristallin cataracté

L'implantation de la lentille intra-oculaire peut prendre place juste après extraction du cristallin cataracté, dans une seule intervention. Ceci demande un calcul pré-opératoire de la puissance du cristallin artificiel ; dans ce cas il faut mesurer les paramètres suivants avant d'extraire le cristallin cataracté :

- a - la longueur axiale de l'oeil (par ultrasonographie) ;
- b - la puissance de la cornée (par kératométrie) ;
- c - la position estimée de la lentille artificielle dans le globe oculaire.



Par application des formules déjà démontrées par divers auteurs^{4,7,9,10,11,14} on arrive à déterminer la puissance de la lentille artificielle. Ces formules se résument comme suit :

1 - 1967 FEDOROV S. V.¹² a montré que la puissance du cristallin artificiel emmetropisant est donnée par :

$$D_k^p = \frac{n - D_c \left(l - k + \frac{k}{n} \right)}{(l - k) \left(1 - \frac{k}{n} \cdot D_c \right)}$$

avec $k = r - \sqrt{r^2 - \frac{D_c^2}{4}}$

r : rayon de courbure de la cornée.

n : indice de refraction de l'humeur aqueuse = 1,336

l : longueur axiale de l'oeil (en mètres)

D_c : puissance de la cornée

D : diamètre de la cornée

2 - 1969 COLENBRENDER¹³ a calculé la formule suivante

$$D_k^p = \frac{n}{(l - d - k)} - \frac{n}{\left(\frac{n}{D_c} - d \right)}$$

avec $k = \text{constante} = 0,15 \text{ mm}$

d : distance entre le sommet de la cornée et la face avant de la lentille.

n : indice de réfraction de l'humeur aqueuse = 1,336

l : longueur axiale de l'oeil

3 - 1970 GERNET¹⁴ a trouvé que :

$$D_k^p = \frac{(n - l D_c)}{(l - d) \left(1 - \frac{d}{n} D_c \right)}$$

Ces formules sont calculées pour une lentille mince plan-convexe (le côté convexe est en face de la cornée), d'épaisseur en général égale à 0,6 mm.

4 - 1976 C.D. BINKHORST¹⁰ a calculé une formule générale pour n'importe quel type de lentille :

$$D_k^p = \frac{n}{l - (v + t - e_1')} - \frac{n}{f'_c - (v + e_1')}$$

ou

n : indice de l'humeur aqueuse = 1,336

$f'_c = \frac{n}{D_c}$: distance focale postérieure de la cornée.

D_c : puissance de la cornée.

$e'_1 = n_1 \cdot \frac{t}{n_2} \cdot \frac{D_{k1}^p}{D_k^p}$: distance entre le sommet de la face arrière et le plan principal image de la lentille (Fig. I-7)

$e_1 = n_1 \cdot \frac{t}{n_2} \cdot \frac{D_{k2}^p}{D_k^p}$: distance entre le sommet de la face avant et le plan principal objet de la lentille.

t : épaisseur de la lentille

n_2 : indice de refraction de la lentille

D_{k1}^p : puissance de la face antérieure de la lentille

D_{k2}^p : puissance de la face postérieure de la lentille

l : longueur axiale de l'œil

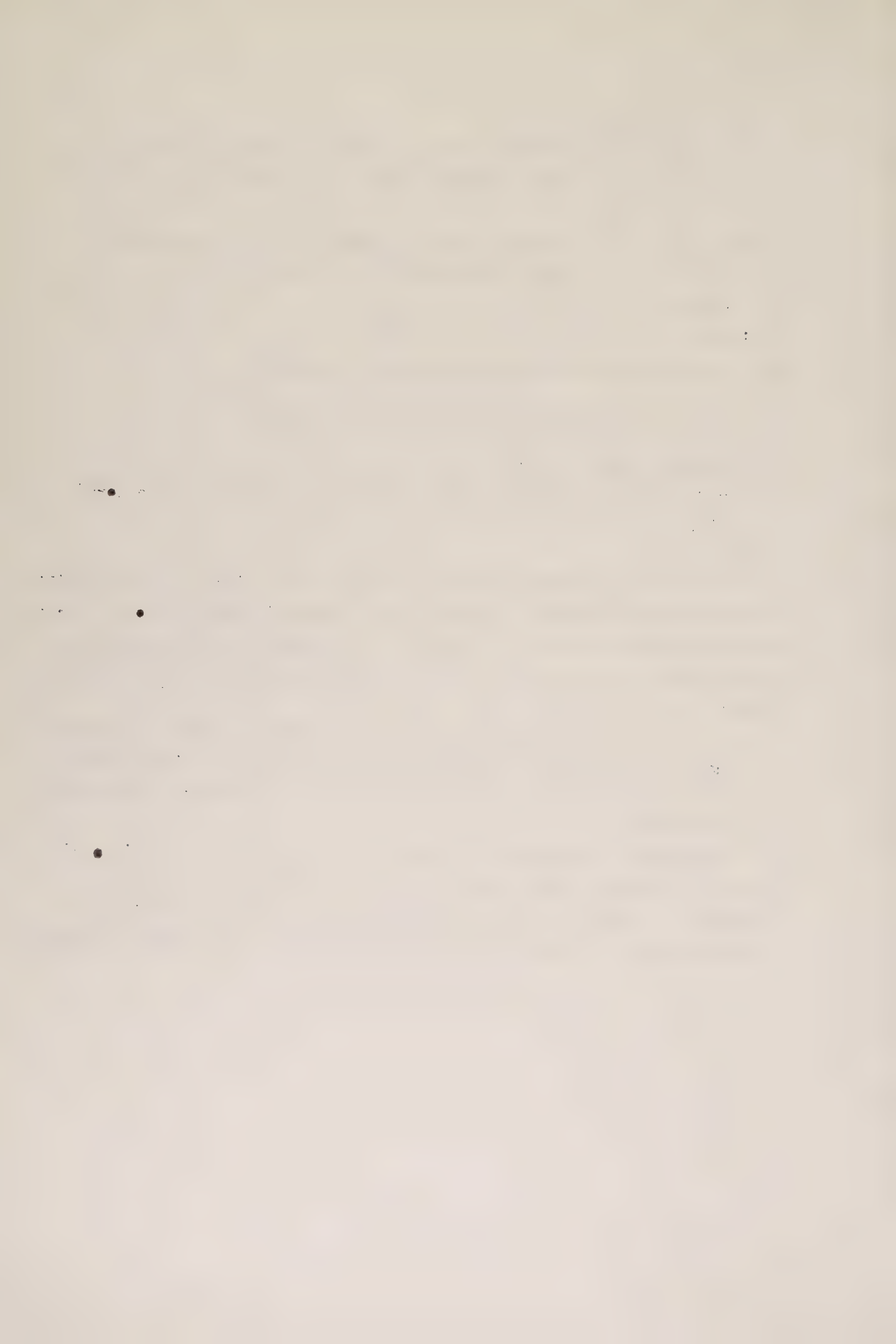
v : profondeur de la chambre antérieure à partir du sommet de la cornée (Fig. I-7).

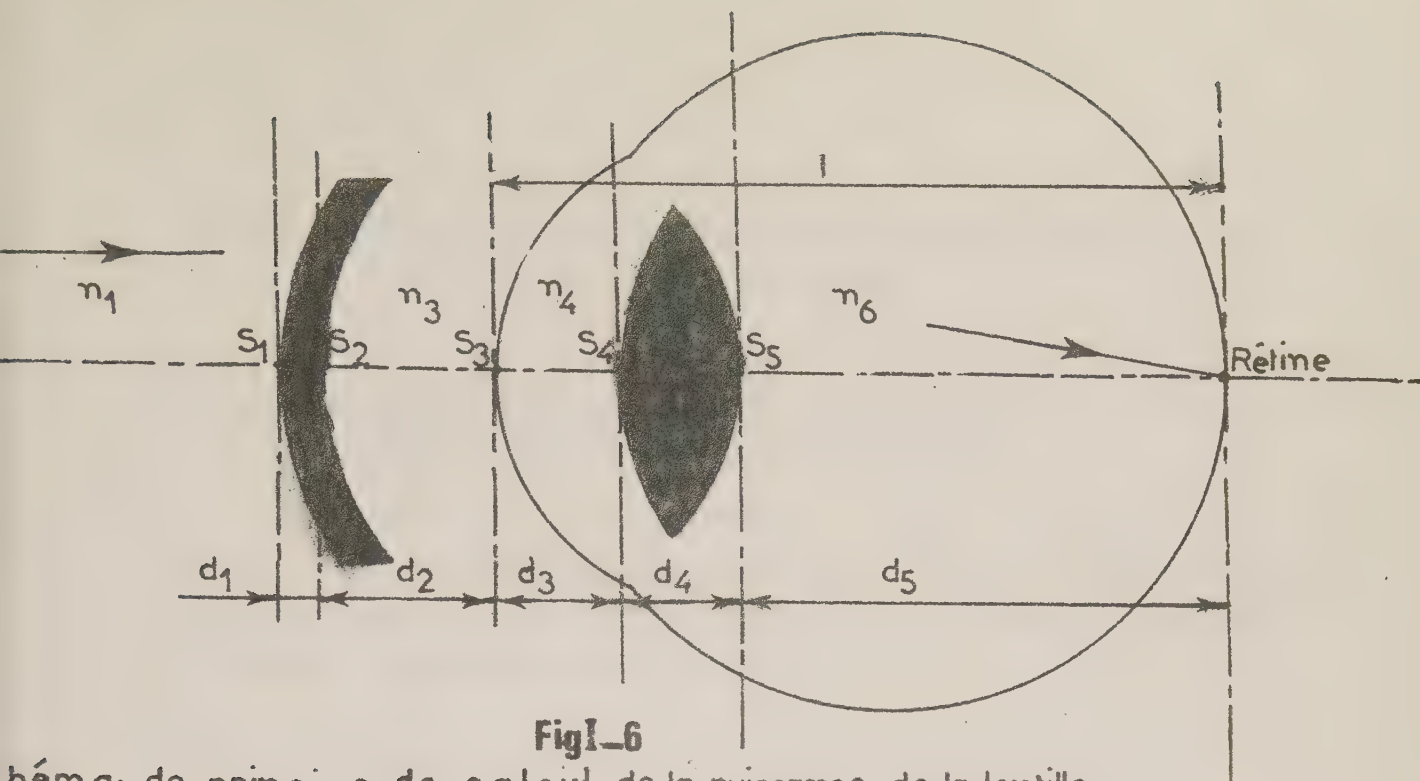
- Conclusion

Les formules récentes permettant d'évaluer la puissance de la lentille intra-oculaire, lentille conduisant à une émmetropisation de l'œil ; ont été passées en revue dans ce chapitre. La détermination de la puissance de la lentille intra-oculaire permet ensuite le calcul des éléments nécessaires à la construction.

En fait ces formules ne s'avèrent pas totalement exactes, les calculs ne tenant pas compte de la qualité de l'image rétinienne. Ainsi l'image recueillie sur la rétine est troublée par suite d'aberrations géométriques et chromatiques.

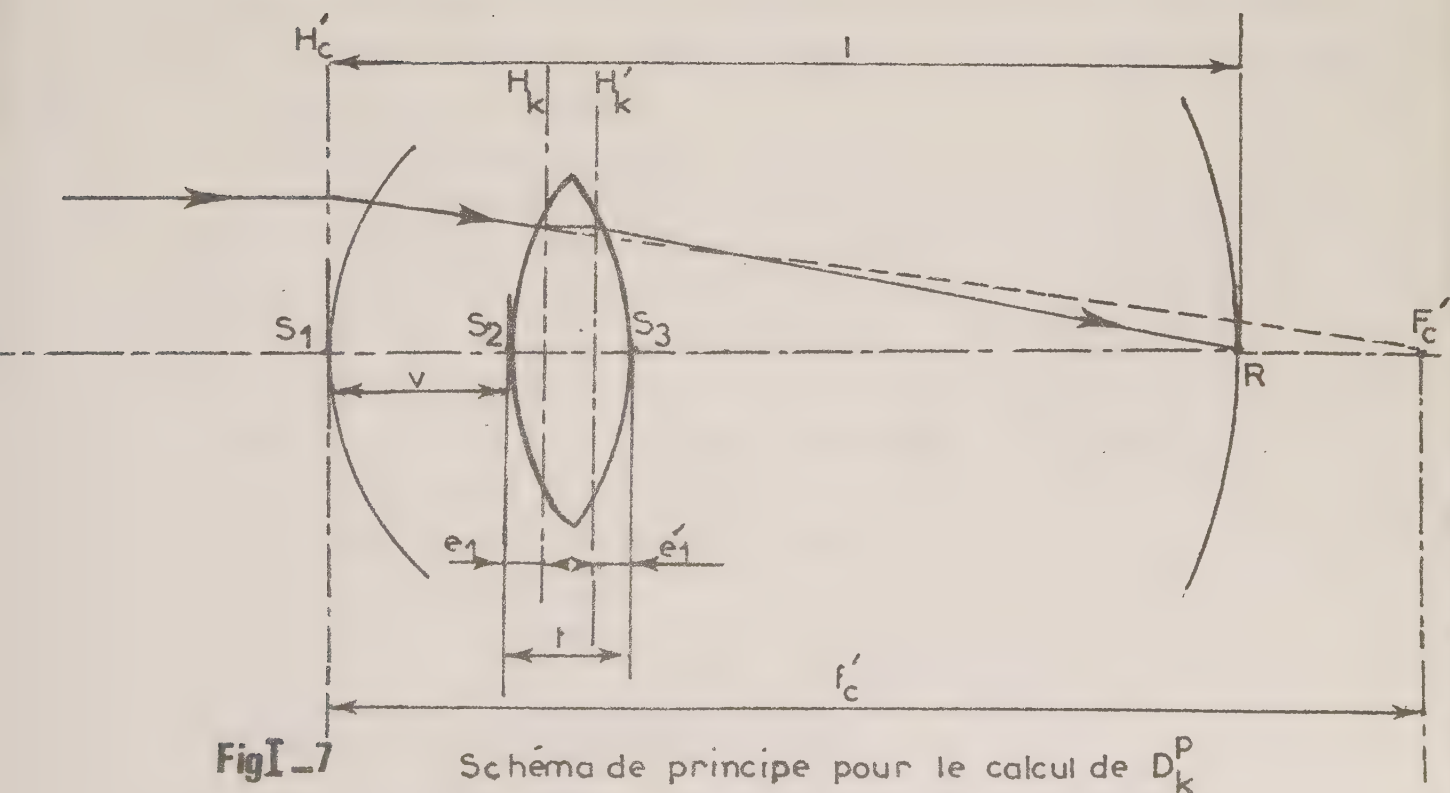
Une méthode automatique de calcul permet de remédier à ces inconvénients. La lentille emmetropisante élaborée à partir de ces nouveaux éléments de construction présente des aberrations minimales de l'image de l'œil corrigé. L'étude de cette méthode fait l'objet du chapitre suivant.





FigI_6

schéma de principe de calcul de la puissance de la lentille intra-oculaire



FigI_7

Schéma de principe pour le calcul de D_k^P

CHAPITRE II

PRINCIPE DE CALCUL AUTOMATIQUE D'UN CRISTALLIN ARTIFICIEL POUR L'OEIL
SCHEMATIQUE ADOPTEII.A TRACE DE LA MARCHE DES RAYONS A TRAVERS L'OEIL

Cette partie a pour but de fournir un schéma utile pour tracer la marche des rayons (méridiens ou obliques) à travers l'ensemble des dioptries de l'oeil supposé sphérique. Ce schéma doit être adapté à une machine automatique programmable (mini-ordinateur).

A.1 PRINCIPE

Soit un rayon incident AJ défini par le point $A(x, y, z)$ (Fig. II-1) et par ces cosinus directeurs (L, M, N) . Ce rayon rencontre le dioptre sphérique du sommet S et du centre C , au point J . $\vec{Sx}$ est l'axe optique, le dioptre sphérique est rapporté au trièdre $Sxyz$. Il s'agit de déterminer les coordonnées (X, Y, Z) du point d'incidence J , et les cosinus directeurs (L', M', N') du rayon réfracté.

- Notations et convention

Dans la figure, la lumière est toujours supposée venir de la gauche. Le sens positif des rayons lumineux est celui de la propagation de la lumière ; l'axe des x est positif vers la droite et l'axe des y positif vers le haut ; le plan est donc orienté dans le sens trigonométrique. Le point J est un point de la surface de séparation de deux milieux homogènes d'indices n et n' , i et i' les angles d'incidence et de refraction.

x, y, z : coordonnées d'un point du rayon incident,

n, n' : indice des milieux objet et image,

ρ : courbure du dioptre,

d : intervalle entre deux dioptries.

- Calcul des coordonnées (X, Y, Z) du point d'incidence J et des cosinus directeurs (L', M', N') du rayon réfracté

Du centre C du dioptre (Fig. II-2) on abaisse la perpendiculaire CH sur le rayon incident AJ et on évalue sa longueur de deux façons dans les triangles rectangles CHA et CJH . On pose $\overline{AJ} = l$.

Le point J étant sur le dioptre sphérique, ses coordonnées satisfont à l'équation :

$$X^2 + Y^2 + Z^2 - 2RX = 0$$

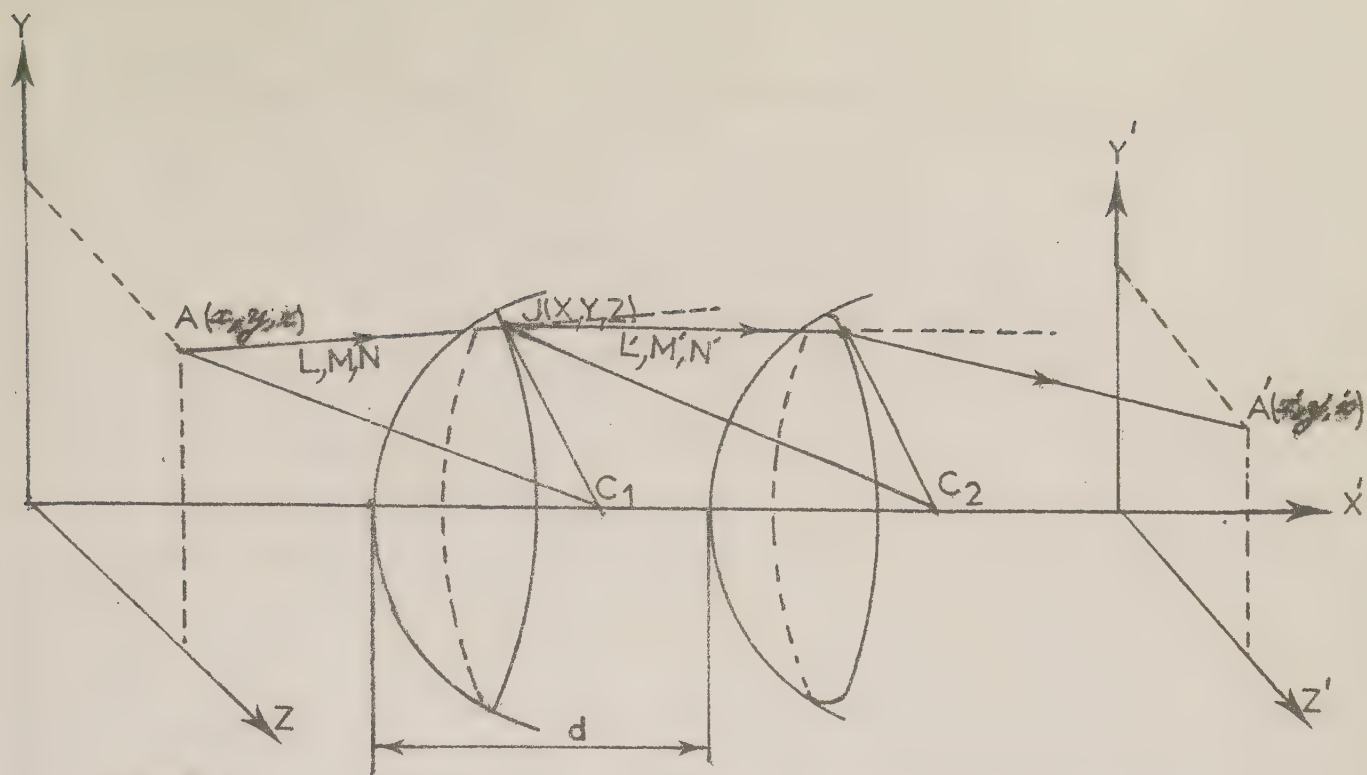


Fig II-1

Schéma de principe de tracé des rayons

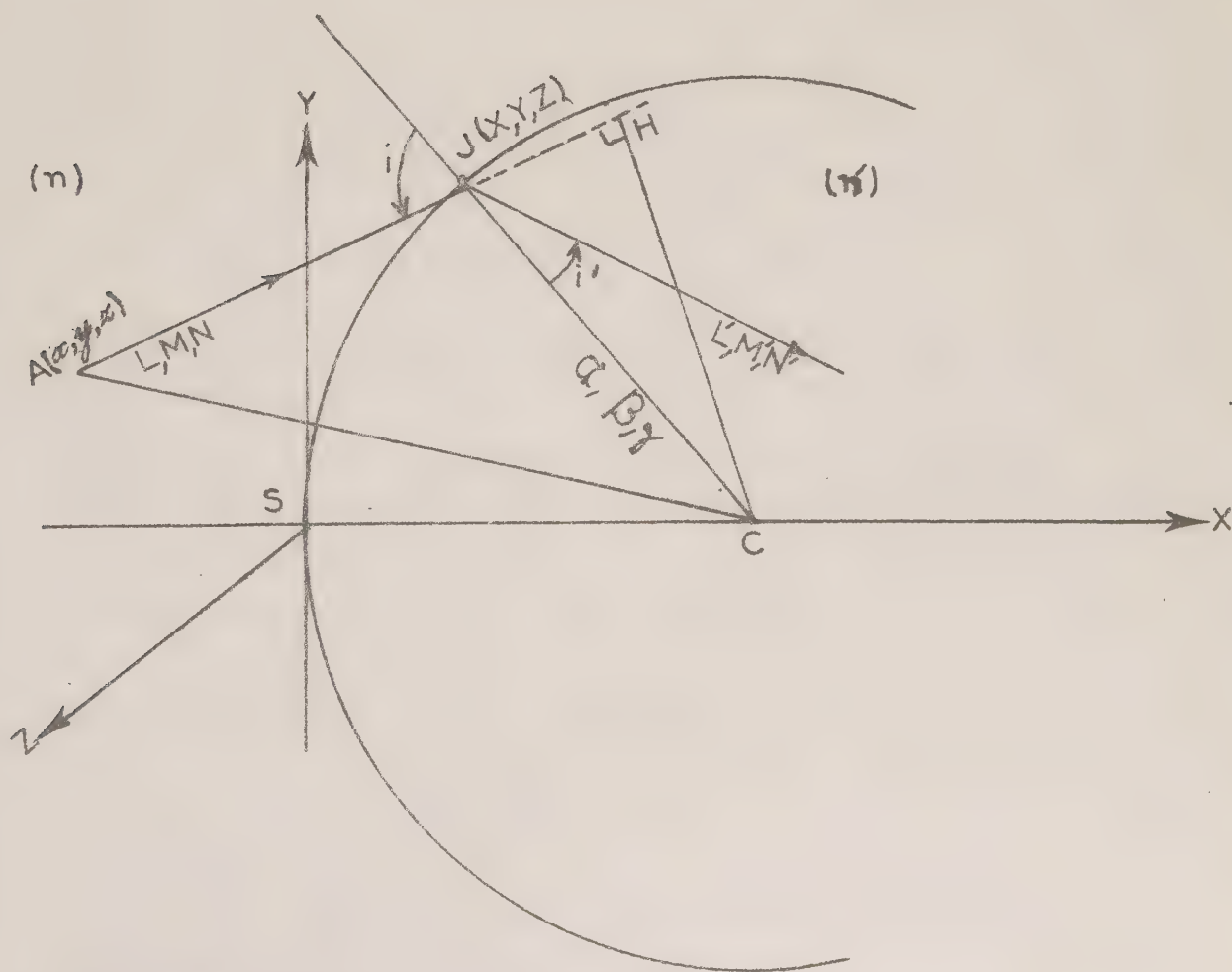


Fig II-2

Schéma de calcul des coordonnées (X, Y, Z)
et des cosinus directeurs (L', M', N')

(R : Rayon du dioptré et $\rho = \frac{1}{R}$ sa courbure qu'on peut écrire sous la forme :

$$(X^2 + Y^2 + Z^2) \rho - 2X = 0 \quad (1)$$

avec $\rho = \frac{1}{R}$

On a, dans les deux triangles rectangles CHA et CJH :

$$\overline{HC}^2 = R^2 \sin^2 i = \overline{AC}^2 - \overline{AH}^2 \quad (2)$$

Le point A a pour coordonnées (x, y, z)

Le point C a pour coordonnées (R, 0, 0)

Ainsi : $\overline{AC}^2 = (x - R)^2 + y^2 + z^2$

D'autre part : $\overline{AH} = \overline{AC} \cos (\overline{AC}, \overline{AJ})$

Les cosinus directeurs de $\overline{AC}$ sont :

$$\begin{aligned} & - \frac{R - x}{\overline{AC}} \\ & - \frac{0 - y}{\overline{AC}} \\ & - \frac{0 - z}{\overline{AC}} \end{aligned}$$

et les cosinus directeurs de $\overline{AJ}$: (L, M, N).

Donc :

$$\cos (\overline{AC}, \overline{AJ}) = L \frac{(R - x)}{\overline{AC}} + M \cdot \frac{(0 - y)}{\overline{AC}} + N \cdot \frac{(0 - z)}{\overline{AC}}$$

Alors : $\overline{AH} = \overline{AC} \cdot \cos (\overline{AC}, \overline{AJ}) = L (R - x) - My - Nz$

$$= - [L (x - R) + My + Nz]$$

En portant la valeur de $\overline{AH}$ dans l'équation (2) il vient :

$$R^2 \sin^2 i = (x - R)^2 + y^2 + z^2 - [L (x - R) + My + Nz]^2$$

D'où :

$$\sin^2 i = (\rho x - 1)^2 + \rho^2 y^2 + \rho^2 z^2 - [L (\rho x - 1) + M \rho y + N \rho z]^2 \quad (3)$$

De cette équation on tire $\sin^2 i'$:

D'après l'équation de DECART $n \sin i = n' \sin i'$

$$\sin^2 i' = \left\{ \frac{n}{n'} \right\}^2 \sin^2 i$$

De même on peut calculer $\cos i$ et $\cos i'$

$$\cos i = \sqrt{1 - \sin^2 i} \quad (4)$$

$$\cos i' = \sqrt{1 - \sin^2 i'} \quad (5)$$

D'autre part on a :

$$l = \overline{AJ} = \overline{AH} - \overline{JH} = - [L (x - R) + My + Nz] - R \cos i$$

qu'on peut écrire sous la forme

$$- \rho l = [L (\rho x - 1) + M \rho y + N \rho z] + \cos i$$

En multipliant les deux membres de l'équation par :

$$\{ [L (\rho x - 1) + M \rho y + N \rho z] - \cos i \},$$

on obtient :

$$- L \rho ([L(\rho x - 1) + My\rho + Nz\rho] - \cos i) = [L(\rho x - 1) + My\rho + Nz\rho]^2 - \cos^2 i$$

Finalement :

$$L = \frac{\rho (x^2 + y^2 + z^2) - 2x}{\cos i - |L(\rho x - 1) + My\rho + Nz\rho|} \quad (6)$$

Ainsi L étant connu, les équations paramétriques classiques des droites donnent les coordonnées de J :

$$\frac{X - x}{L} = L \quad X = x + L^2 \quad (7)$$

$$\frac{Y - y}{L} = M \quad Y = y + ML \quad (8)$$

$$\frac{Z - z}{L} = N \quad Z = z + NL \quad (9)$$

Les cosinus de la normale sur le dioptré en J sont données par :

$$\alpha = - \frac{X - R}{R} = 1 - \rho X \quad \text{avec} \quad \rho = \frac{1}{R} \quad (10)$$

$$\beta = - \rho Y \quad (11)$$

$$\gamma = - \rho Z \quad (12)$$

Enfin, pour déterminer L', M', N' on applique les formules classiques du trigonométrie sphérique¹⁵ :

$$n' L' - n L = (n' \cos i' - n \cos i) \cdot \alpha$$

$$n' M' - n M = (n' \cos i' - n \cos i) \cdot \beta$$

$$n' N' - n N = (n' \cos i' - n \cos i) \cdot \gamma$$

Soit :

$$L' = \frac{n}{n'}, L + (\cos i' - \frac{n}{n'}, \cos i) \alpha \quad (13)$$

$$M' = \frac{n}{n'}, M + (\cos i' - \frac{n}{n'}, \cos i) \beta \quad (14)$$

$$N' = \frac{n}{n'}, N + (\cos i' - \frac{n}{n'}, \cos i) \gamma \quad (15)$$

- Tracé de la marche du rayon à travers l'ensemble des dioptrés

Les coordonnées (X, Y, Z) du point J et les cosinus directeurs (L', M', N') du rayon réfracté sont calculées pour le premier dioptré, on peut passer au deuxième dioptré en considérant que le point J joue pour le deuxième dioptré le rôle du point A pour le premier. En utilisant ainsi les formules de passage :

$$x_{k+1} = X_k - d_k \quad \text{avec} \quad d_k = S_k S_{k+1} \quad (16)$$

$$y_{k+1} = Y_k \quad (17)$$

$$z_{k+1} = Z_k \quad (18)$$

De même :

$$L_{k+1} = L'_k$$

$$M_{k+1} = M'_k$$

$$N_{k+1} = N'_k$$

et, pour les indices :

$$n_{k+1} = n'_k$$

Ainsi peut-on suivre la marche d'un rayon depuis le premier dioptre jusqu'au dernier dioptre.

A.2 FORMULES UTILISEES DANS LA REALISATION DU PROGRAMME DE TRACE DE LA MARCHE DES RAYONS.

Pour réduire la longueur du programme du tracé de la marche des rayons, on a condensé les formules calculées précédemment sous la forme suivante :

$$A = \rho x - 1$$

$$B = \rho y$$

$$C = \rho z$$

$$\sin^2 i = S^2 = A^2 + B^2 + C^2 - (LA + MB + NC)^2$$

$$\sin^2 i = \left(\frac{n}{n'} \right)^2 \sin^2 i'$$

$$\cos i = \sqrt{1 - \sin^2 i}$$

$$\cos i' = \sqrt{1 - \sin^2 i'}$$

$$l = w_8 = \frac{Ax + By + Cz - x}{\cos i - (AL + BM + CN)}$$

$$X = x + l \cdot L$$

$$Y = y + l \cdot M$$

$$Z = z + l \cdot N$$

$$L' = \frac{n}{n'} L + \left(\frac{n}{n'} \cos i - \cos i' \right) (A + lp \cdot L)$$

$$M' = \frac{n}{n'} M + \left(\frac{n}{n'} \cos i - \cos i' \right) (B + Mlp)$$

$$N' = \frac{n}{n'} N + \left(\frac{n}{n'} \cos i - \cos i' \right) (C + Nlp)$$

Formules de transfert d'origine :

$$x'_{k+1} = x_k - d_k \quad \dots \quad d_k = S_k S_{k+1}$$

$$y'_{k+1} = y_k$$

$$z'_{k+1} = z_k$$

Un additif à cette chaîne permet le calcul des points d'intersection des rayons émergents avec une série de plans normaux à l'axe optique et tangents aux dioptrés. Les formules de calcul de ces points d'intersections sont données par :

$$y_p = Y - \left(\frac{M}{L} \right) X$$

$$z_p = Z - \left(\frac{N}{L} \right) X$$

Le déroulement du calcul est assuré à l'aide des formules de contrôle c'est-à-dire que l'ordinateur s'arrête immédiatement :

1) lorsque $\sin^2 i > 1$, ce qui se traduit par une incidence trop grande et une reflexion totale du rayon incident sur le dioptré ;

2) lorsque le rayon ne rencontre pas le dioptré, ce qui se traduit analytiquement par :

a) $\rho (X^2 + Y^2 + Z^2) - 2X \neq 0$

b) $y_p > H$ (H : rayon de la pupille réelle du dioptré suivant Oy)

c) $z_p > H$

3) lorsque L devient négatif, cette circonstance n'entraîne aucune difficulté analytique ; mais elle est physiquement absurde, et le calcul n'a pas de sens.

A.3 DESCRIPTION DU PROGRAMME

Le programme général de tracé de la marche des rayons comporte trois sous-programmes :

SP1 : calcule les coordonnées du point d'incidence (X, Y, Z) et les cosinus directeurs (L', M', N') .

SP2 : réalise le tracé des rayons à l'aide d'une représentation tridimensionnelle, au moyen d'une table traçante reliée directement à l'ordinateur.

SP3 : réalise une trace du diagramme des points : c'est-à-dire l'ensemble des points d'intersection des rayons refractés avec la rétine.

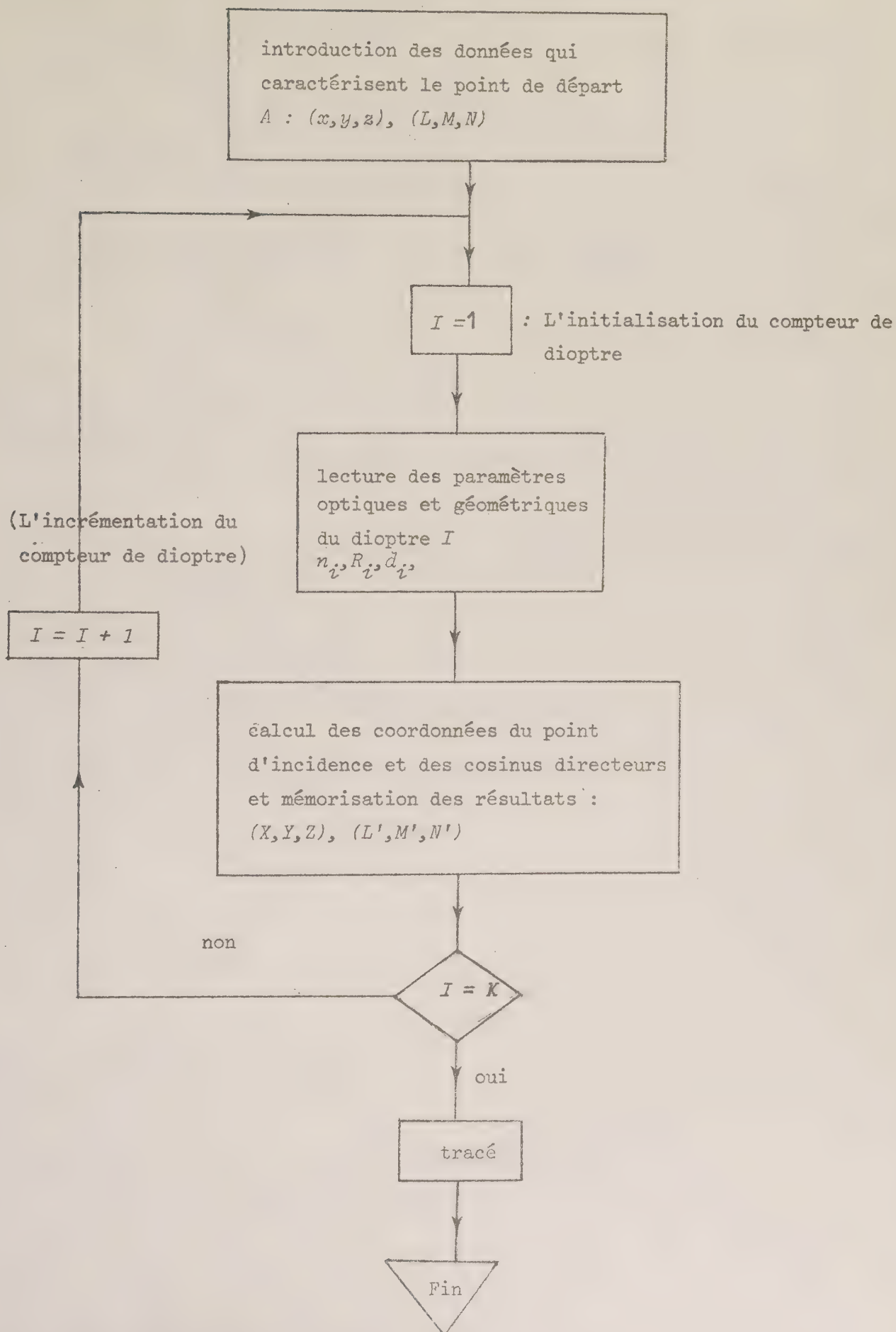
Organigramme et listing du programme (cf. pages 19, 20, 21)

A.4 PROGRAMME POUR LA DÉTERMINATION D'UNE GÉOMÉTRIE DE L'OEIL

Ce programme se compose de deux sous-programmes : SP1 et SP2.

- SP1 : calcule les points d'intersections (X, Y) des dioptrés qui se coupent et les angles d'ouverture Q_i de ces dioptrés avec l'axe $\vec{Ox}$ (Fig. II-3)

ORGANIGRAMME DU PROGRAMME



K : le nombre de dioptries


```

REM: PROGRAMME DE LA TRACE DE LA MARCHE DES RYONS *****
REM : ( LE POINT DE DEPART (A) EST DEFINI PAR H,Q,L,M,N)
DIM P(8,8)
REM : L'ENTREE DES ELEMENTS CARACTERISTIQUES OPTIQUES ET GEOMETRIQUES
REM      DE L'OEIL
FOR I=1 TO 6
READ P(I,1),P(I,2),P(I,3),P(I,4),P(I,5)
NEXT I
DATA 1,7,8,0,0,5,1,3771,6,5,55,55,5,1,3374
DATA 12,6704,3,6,3,05,4
DATA 1,49166,-15,4324,9,44844,5,84844,4
DATA 1,336,-11,7,24,2,14,75156,20
DATA 1,336,0,0,0,0
REM : COURBURES DES DIOPTRES ET RAPORTS DES INDICES
FOR I=1 TO 5
LET P(I,6)=1/P(I,2)
LET P(I,7)=P(I,1)/P(I+1,1)
NEXT I
LET L2=0
REM: APPEL DU SOUS PROGRAMME DE TRACE
CALL(13,0,0,1)
CALL(13,2,0,10)
REM: FORMAT ET COEFICIENT D'INCREMENTATION
LET K3=100
LET N9=10
REM: L'ENTREE DES PARAMETRES QUI DEFINI LE POINT DE DEPART (A)
REM: DU 1' RAYON CHOISI (RAYON MERIDIEN PARAXIAL)
INPUT H0,Q0,L0,M0,N0
LET Q0=Q0*3.141592/180
LET L0=COS(L0*3.141592/180)
LET M0=COS(M0*3.141592/180)
LET N0=COS(N0*3.141592/180)
REM: BOUCLE POUR CHANGER LE RAYON EN HAUTEUR
FOR T=-4 TO 4 STEP .5
LET H=T*H0*L0
REM: BOUCLE POUR CHANGER LE RAYON EN ANGLES
FOR S=0 TO 0
LET L=L0
LET M=M0
LET N=N0
LET Q=S*Q0
LET X0=(-4)*K3
LET Y0=K3*H*COS(Q)
LET Z0=K3*H*SIN(Q)
LET X=-4
LET Y=H*COS(Q)
LET Z=H*SIN(Q)
REM: TRACE DU POINT DE DEPART (A)
LET Y0=Y0-L2
CALL(13,X0,Y0,5)
LET L2=L2+2
REM: BOUCLE DE PASSAGE AU SOUS PROGRAMME DE TRACE
FOR I=1 TO 5
REM : (CAS DE : 4 DIOPTRES + LA RETINE )
GOSUB 2000
NEXT I
NEXT S
NEXT T
END
REM: SOUS PROGRAMME DE TRACE
REM: FORMULES DE TRANSFERTS
LET X=X-P(I,4)

```



```

2030 REM:CONTROLE DES COSSINUS DIRECTEURS:
2040 LET K1=L^2+M^2+N^2
2050 IF K1 > 1.0001 THEN 2661
2060 REM:CALCUL DE SINUS CARRE DE L'ANGLE D'INCIDENCE
2070 LET A1=X*P(I,6)-1
2080 LET B1=Y*P(I,6)
2090 LET C1=Z*P(I,6)
2100 REM:SINUS CARRE:
2110 LET S2=A1^2+B1^2+C1^2-(L*A1+M*B1+N*C1)^2
2120 REM:CONTROLE DE SINUS CARRE DE L'ANGLE D'INCIDENCE:
2130 IF S2 > 1 THEN 2663
2140 IF S2 < 0 THEN 2665
2150 REM:CALCUL ET MEMORISATION DE L'ANGLE D'INCIDENCE ET DE REFRACTION
2160 LET T1=(SOR(S2))/(SOR(1-S2))
2170 LET T0=(SOR(P(I,7)^2*S2))/(SOR(1-P(I,7)^2*S2))
2180 REM:CALCUL DU CHEMIN OPTIQUE
2190 LET W8=(A1*X+B1*Y+C1*Z-X)/(SOR(1-S2)-(L*A1+M*B1+N*C1))
2200 REM:CONTROLE DU CHEMIN OPTIQUE:
2230 IF W8 < 0 THEN 2667
2240 REM:CALCUL ET MEMORISATION DES COORDONNEES D'INCIDENCES
2250 LET X8=X+L*W8
2270 LET Y8=Y+M*W8
2290 LET Z8=Z+N*W8
2310 REM:CALCUL DES COORDONNEES DES POINTS D'INTERSECTIONS DES RAYONS
2311 REM:AVEC LES # PLANS NORMEAUX A L'AXE OPTIQUE ET TANGENTS AUX #
2312 REM: DIOPTRIS ,CONTROLE ET MEMORISATION
2320 LET Y7=Y-(M/L)*X
2340 LET Y7=ABS(Y7)
2350 IF Y7>P(I,5) THEN 2670
2360 LET Z7=Z-(N/L)*X
2370 LET Z7=ABS(Z7)
2380 IF Z7>P(I,5) THEN 2670
2390 REM: FORMULE DE CONTROLE DE SPHERECITE
2400 LET K2=(X8^2+Y8^2+Z8^2)*P(I,6)-2*X8
2410 IF K2>1E-4 THEN 2670
2420 REM:CALCUL DES NOUVELLES COSSINUS DIRECTEURS, MEMORISATION
2430 LET L1=P(I,7)*(SOR(1-S2))-SOR(1-P(I,7)^2*S2)
2440 LET L=P(I,7)*L+L1*(A1+W8*L*P(I,6))
2450 LET M=P(I,7)*M+L1*(B1+W8*M*P(I,6))
2460 LET N=P(I,7)*N+L1*(C1+W8*N*P(I,6))
2470 REM:TRACE DES RAYONS :REPRESENTATION BIDIMENSIONNELLE
2480 REM:CHOIX DE L'INCREMENTATION
2490 LET A1=(X8-X)/N9
2510 LET B1=(Y8-Y)/N9
2530 LET C1=(Z8-Z)/N9
2540 FOR J=1 TO N9
2570 LET X9=K3*(X+J*A1+P(I,3))
2580 LET Y9=K3*(Y+B1*J)
2590 LET Z9=K3*(Z+C1*J)
2600 CALL(13,X9,Y9,6)
2610 NEXT J
2620 REM:CHANGEMENT DES ANCIENNES COORDONNEES PAR LES NOUVELLES
2630 LET X=X8
2640 LET Y=Y8
2650 LET Z=Z8
2660 RETURN
2661 PRINT "K1>1.0001",K1
2662 GOTO 2670
2663 PRINT "S2>1",S2;TAB(30);"I=";I
2664 GOTO 2670
2665 PRINT "S2<0",S2;TAB(30);"I=";I
2666 GOTO 2670
2667 PRINT "W8<0",W8;TAB(30);"I=";I
2668 GOTO 2670
2669 GOTO 2670

```


Les coordonnées du point d'intersection sont données par :

$$X = \frac{(R_i^2 + R_{i+1}^2 + X_{i+1}^2 - X_i^2)}{2 (X_{i+1} - X_i)}$$

$$Y = \sqrt{R_i^2 - (X_i - X)^2}$$

et l'angle d'ouverture Q_i par :

$$Q_i = \text{Arc tg } \frac{Y}{X_i - X}$$

avec :

R_i : rayon de courbure du dioptre i

R_{i+1} : rayon de courbure du dioptre $(i + 1)$

X_i : distance entre le centre C_i et l'origine S

X_{i+1} : distance entre le centre C_{i+1} et l'origine S

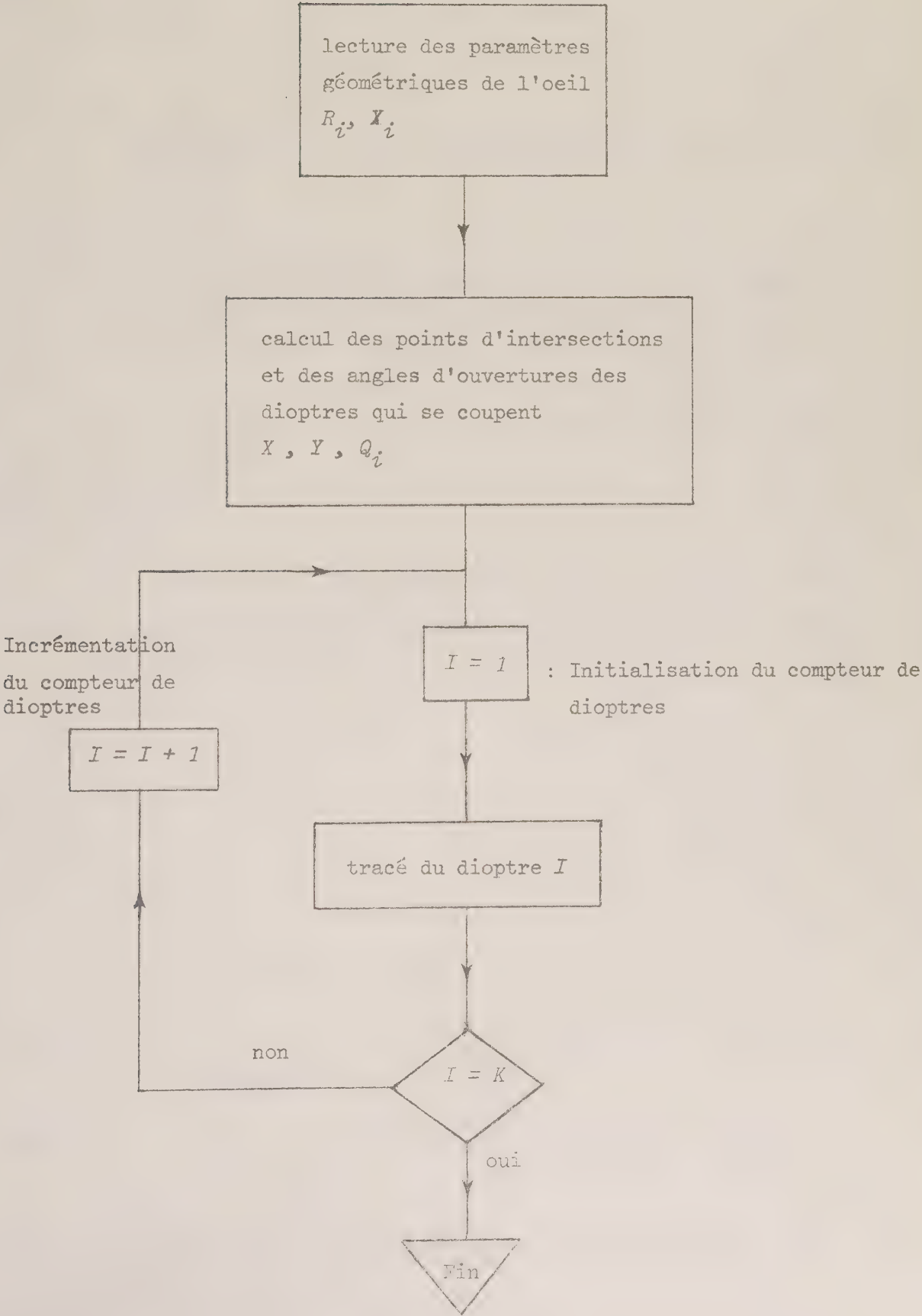
- SP2 : trace les différents dioptres de l'oeil schématique. Organigramme et listing du programme (cf. pages 23,24,25). On représenté dans la fig. (II-4) un tracé de l'oeil schématique par ce programme.

- Remarques et résultats obtenus :

Les figures II-5 à II-9 montrent l'allure de la marche des rayons méridiens dans le cas de l'oeil schématique. Ces figures représentent une série de tracés des rayons pour différentes inclinaisons à partir de l'axe pupillaire : 0° , 5° , 10° , 15° .

La figure II-8 représente la marche des rayons pour un point objet situé sur l'axe optique et au foyer objet de l'oeil. On constate que les rayons provenant d'un point objet ne convergent plus au même point et se coupent en des points dispersés. Ainsi la connaissance de la marche réelle des rayons nous permet de déterminer l'allure et les dimensions de la tache image qui se forme sur la rétine à l'aide du diagramme des points , donnant les intersections des rayons avec la rétine.

ORGANIGRAMME DU PROGRAMME



K : nombre de dioptres

-LISTING DU PROGRAMME

```

REM:TRACE DE L'OEIL EQUIPE PAR UNE LENTILLE
DIM N(5),R(5),T(5),X(5),Y(5),Q(5),D(5),L(5)
REM:L'ENTREE DES PARAMETRES GEOMETRIQUES DE L'OEIL
LET F=3.141592
REM:FORMAT
LET K=100
REM:LES INCREMENTATIONS
FOR I=1 TO 5
  READ N(I)
NEXT I
DATA 10,100,10,10,10
REM:LES RAYONS DE COURBURES ET LES TRANSLATIONS DES CENTRES PAR RAPPORT
  A L'ORIGINE
FOR I=1 TO 4
  READ R(I),T(I)
NEXT I
DATA 7.8,7.8,11.7,12.5,12.67,16.27,15.43,-5.98
REM:L'ENTREE DES PARAMETRES GEOMETRIQUES DE LA FACE POSTERIEURE
  DE LA CORNEE
REM:RAYON DE COURBURE ET LA TRANSLATION PAR RAPPORT A L'ORIGINE
LET R(5)=6.7
LET T(5)=7.05
REM:LES ANGLES D'OUVERTURES AVEC L'AXE OPTIQUE DE LA FACE POSTERIEURE
  DE LA CORNEE
REM: L'ANGLE DE DEPART
LET D(5)=2.3293
REM:L'ANGLE LIMITE
LET L(5)=3.9738
REM:CALCUL DES POINTS D'INTERSECTIONS DES DIOPTRES QUI SE COUPENT
GOSUB 1000
REM:TRANSFORMATION DES ANGLES D'OUVERTURES ADES ANGLES DE DEPARTS
  ET DES ANGLES LIMITES
REM:LE 1" DIOPTRE
LET D(1)=F+Q(1)
LET L(1)=F-Q(1)
REM:LE 2" DIOPTRE
LET D(2)=F+Q(2)
LET L(2)=3*F-Q(2)
REM:LE 3" DIOPTRE
LET D(3)=F+Q(3)
LET L(3)=F+Q(3)
REM:LE 4" DIOPTRE
LET D(4)=2*F+Q(4)
LET L(4)=2*F-Q(4)
REM:APPEL DE SOUS PROGRAMME DE TRACE
CALL(13,0,0,1)
CALL(13,2,0,10)
REM:INITIALISATION DE LA TABLE TRACANTE:
LET L1=0
FOR I=1 TO 5
  GOSUB 1200
NEXT I
CALL(13,0,-L1,5)
END
REM:SOUS PROGRAMME QUI CALCUL LES POINTS D'INTERSECTIONSET LES
  ANGLES D'OUVERTURES DES DIOPTRES QUI SE COUPENT
FOR I=1 TO 3 STEP 2
  LET X(I)=(R(I)^2-R(I+1)^2+T(I+1)^2-T(I)^2)/(2*(T(I+1)-T(I)))
  LET Y(I)=SQR(R(I)^2-(X(I)-T(I))^2)
NEXT I
FOR I=1 TO 4

```



```

070 IF I>2 THEN 1110
080 LET Y0=Y(1)
090 LET X0=X(1)
100 GOTO 1130
110 LET Y0=Y(3)
120 LET X0=X(3)
130 LET Q(I)=ATN(Y0/(T(I)-X0))
140
140 NEXT I
150 RETURN
200 REM : SOUS PROGRAMME DE TRACE
210 REM : TRACE DU POINT DE DEPART
220 LET X4=K*(T(I)+R(I)*COS(D(I)))
230 LET Y4=K*R(I)*SIN(D(I))
240 LET Y4=Y4-L1
240 CALL(13,X4,Y4,5)
242 LET L1=L1+2
250 REM : L'INCREMENTATION DES ANGLES D'OUVERTURES:
260 LET A=(L(I)-D(I))/N(I)
270 REM : TRACE POINT PAR POINT
280 FOR J=1 TO N(I)
290 LET W=D(I)+J*A
300 LET X3=K*(T(I)+R(I)*COS(W))
310 LET Y3=K*R(I)*SIN(W)
320 CALL(13,X3,Y3,6)
330 NEXT J
340 RETURN
350 NEXT I

```

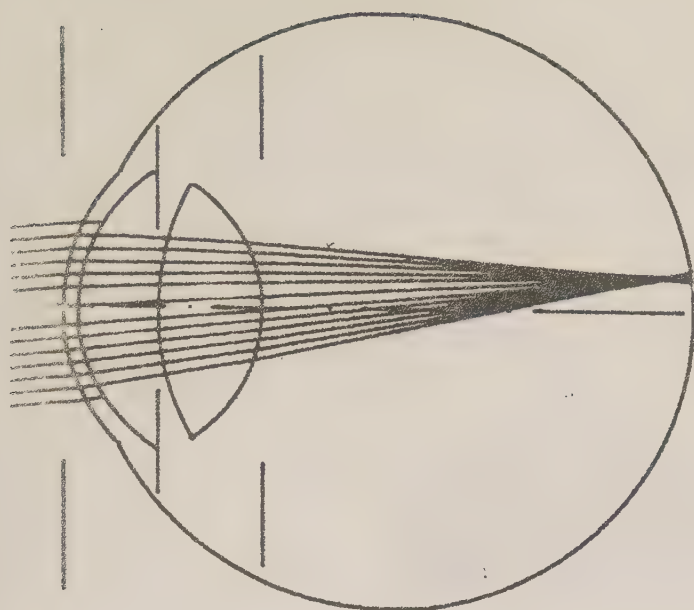



Fig II-6 $\theta = 5^\circ$

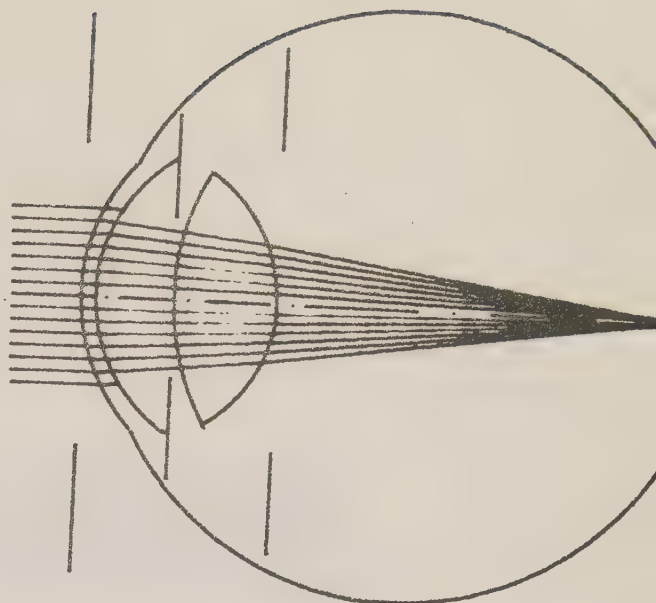


Fig II-5 $\theta = 0^\circ$

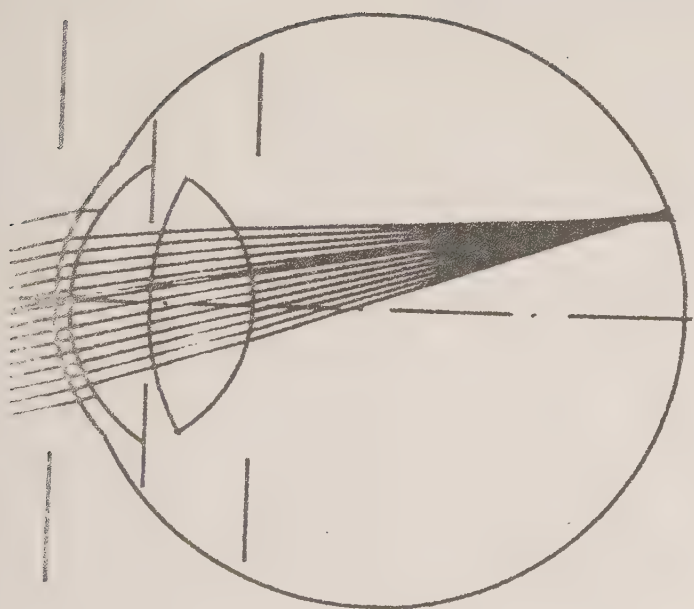


Fig II-8 $\theta = 15^\circ$

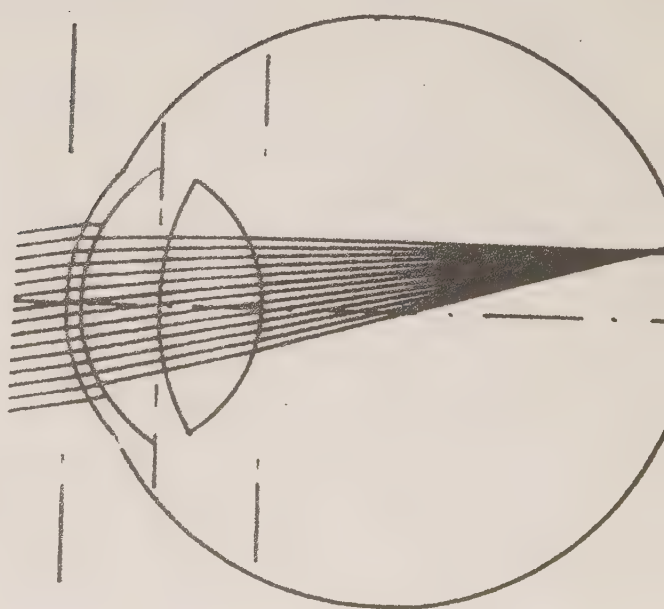


Fig II-7 $\theta = 10^\circ$

-TRACE DE LA MARCHE DES RAYONS POUR DIFFERENTES
INCLINAISONS θ DU FAISCEAU PAR RAPPORT A L'AXE
OPTIQUE

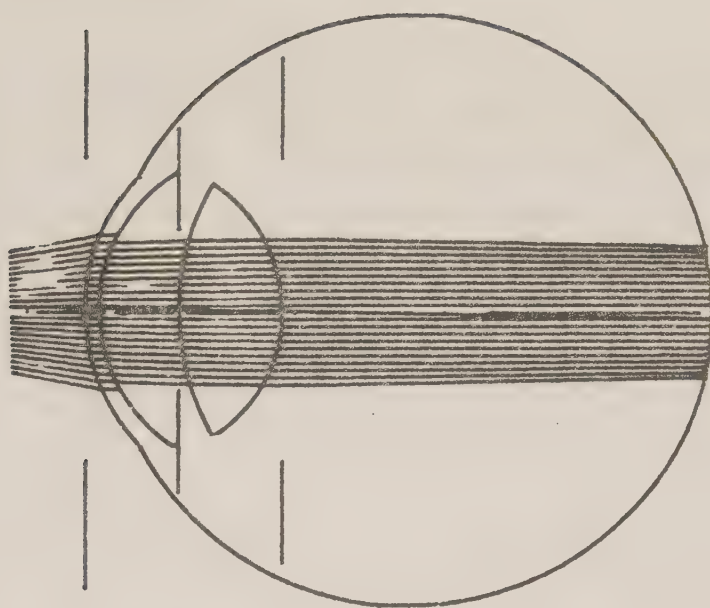


Fig II-9 TRACE DE LA MARCHE DES RAYONS POUR UN POINT
OBJET AU Foyer OBJET DE L'OEIL

B - RAPPEL DES DIFFERENTES METHODES DE CALCUL AUTOMATIQUE DES COMBINAISONS OPTIQUES

La littérature optique offre une très grande variété de méthodes pour l'étude des systèmes optiques, exigeant des calculs numériques fort longs, établis à partir de schémas précis.

L'apparition des ordinateurs a facilité la résolution des techniques de calcul. Les principaux avantages de l'utilisation des ordinateurs sont les suivants :

- détermination rationnelle, pour un schéma optique donné de la combinaison optimale ;
- établissement logique et précis des tolérances de fabrications.

Ainsi, plusieurs méthodes de calcul ont été proposées dans ce domaine. On rappelle ici brièvement quelques unes des méthodes principales :

B - 1. Méthode de Beker¹⁶:

Beker a développé un programme pour l'étude automatique des systèmes optiques. Il s'agit tout d'abord de tracer les rayons pupillaires pour déterminer les points d'intersection de ces rayons avec le plan image de Gauss ; puis, à partir de ces points, on construit des sphères tangentielles au plan pupillaire de sortie du système optique. On calcule les chemins optiques alternants des rayons, chemins entre une sphère de référence centrée sur le point image Gaussien et la sphère construite suivant la marche réelle des rayons. Ces quantités sont établies pour quelques points-objets, et pour trois couleurs. On détermine également des quantités additionnelles caractérisant les propriétés physiques du système (que l'on verra par la suite).

Le système est caractérisé par une fonction Φ (appelée fonction de mérite), fondée sur le critère général de Wachendorf^{17, 18} relatif aux aberrations du front d'onde.

La fonction de mérite est définie par :

$$\Phi = \sum_i S_i^2$$

ou S_i représente l'aberration du rayon numéro i , ou la quantité additionnelle.

Le problème du calcul des systèmes optiques revient à trouver un minimum pour $\overline{\Phi}$. La fonction de mérite est minimisée, soit par variation d'un seul paramètre à la fois, soit par variation d'un groupe de paramètres de construction du système optique.

B - 2. Gordon Black^{19, 20, 21} :

Le principe de la méthode est proche de celui de Beker ; une fonction de mérite $\overline{\Phi}$ est construite à partir des aberrations du système - aberrations calculées par la méthode de tracé des rayons à l'aide des formules trigonométriques²². La fonction de mérite est minimisée par modification des paramètres du système optique, il y a quatre méthodes de modification des paramètres :

1) Variable par variable : un seul paramètre parmi les nombreux paramètres du système est choisi au départ. On calcule la fonction de mérite minimum correspondant à ce dernier (choisi comme variable), en utilisant la méthode de Newton, on fait ensuite le même calcul séquentiellement, pour chaque paramètre du système.

2) Opération d'ensemble : un groupe de paramètres est changé ; on détermine une valeur minimale de $\overline{\Phi}$.

3) Opération extrapolée : extrapolation de la solution à partir d'un certain nombre de systèmes dont les fonctions de mérite sont connues. On obtient ainsi un nouveau système avec une valeur de $\overline{\Phi}$ plus faible.

4) Opération aléatoire : modification aléatoire des paramètres d'un premier modèle en utilisant une suite de nombres aléatoires.

On déduit de ces quatre méthodes de modifications celle conduisant à la fonction minimale.

Cependant il ressort d'un examen de la littérature dans ce domaine que la correction automatique des systèmes optiques par la méthode de Black est trop longue et trop indirecte.

B - 3. Donald P. Feder :

L'une des principales méthodes de calcul automatique

des combinaisons optiques a été proposée par Donald P. Feder²³. Dans ce travail l'approche de la fonction de merite est utilisée de manière habituelle. Les termes d'aberrations sont définis en fonction de paramètres X_k du système. La fonction de merite,

$$\overline{\Phi} = \sum_i u_i S_i^2, \quad (19)$$

où les u_i sont des facteurs choisis par le réalisateur, est constituée de telle manière que ressorte la contribution des aberrations jugées importantes du point de vue des spécifications du système ; S_i désigne, comme précédemment, l'aberration du rayon numéro i . Le problème consiste à trouver un minimum pour $\overline{\Phi}$. Dans ce qui suit, on suppose que u_i est incorporé à S_i .

Pour minimiser $\overline{\Phi}$, on calcule le vecteur gradient $\vec{G}$:

$$\vec{G} = \frac{1}{2} \text{grad } \overline{\Phi}$$

où :

$$\text{grad } \overline{\Phi} = \left(\frac{\partial}{\partial X_1}, \frac{\partial}{\partial X_2}, \dots, \frac{\partial}{\partial X_N} \right)$$

N étant le nombre total de paramètres choisis comme variables dans le système optique.

En différenciant l'expression (19) on obtient :

$$\frac{\partial \overline{\Phi}}{\partial X_k} = 2 \sum_i S_i \left(\frac{\partial S_i}{\partial X_k} \right)$$

en rappelant la définition de la matrice Jacobienne J :

$$J = \left\{ \frac{\partial S_i}{\partial X_k} \right\} = \begin{pmatrix} \frac{\partial S_1}{\partial X_1} & \dots & \frac{\partial S_1}{\partial X_N} \\ \frac{\partial S_2}{\partial X_1} & \dots & \frac{\partial S_2}{\partial X_N} \\ \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial S_M}{\partial X_1} & & \frac{\partial S_M}{\partial X_N} \end{pmatrix}$$

et en posant :

$$S = \begin{pmatrix} S_1 \\ S_2 \\ \vdots \\ S_M \end{pmatrix}$$

on exprime le gradient par :

$$\vec{G} = J \cdot S$$

une condition nécessaire (bien qu'elle ne soit pas suffisante) pour que $\overline{\Phi}$ soit minimale et que $\vec{G} = \vec{0}$.

La méthode utilisée est celle dite du gradient maximum. Sous des conditions assez générales, cette méthode converge vers un minimum.^{24, 25}

La construction de la fonction de mérite $\overline{\Phi}$ et de ses formes dérivées constitue une partie capitale de la technique ²⁶. Les fonctions d'aberrations S_i font partie de plusieurs catégories distinctes. Celles-ci peuvent être décrites comme :

- 1 - L'erreur de l'image
- 2 - Les aberrations chromatiques
- 3 - La distortion et la courbure de champ
- 4 - La longueur focale
- 5 - Restriction sur la longueur focale
- 6 - Conditions limites

L'expression de base qui exprime l'erreur de l'image est essentiellement une mesure de l'écart entre le front d'onde image et une sphère de référence centrée sur le point image parxial.

En bref, la fonction caractéristique de Hamilton ²⁷ est utilisée pour déduire une expression de l'écart de front d'onde. Ceci peut être déterminé pour un rayon donné, en utilisant le rayon principal comme référence, le nombre de fonctions d'erreurs de l'image présent en $\overline{\Phi}$ est donc dépendant du nombre de rayons tracés.

B - 4. Joseph Meiron :

La fonction de mérite utilisée est basée sur la distribution de rayons tracés dans le plan image. Les rayons de chaque point objet sont tracés dans le système et les différences entre le rayon principal et les autres rayons, mesurées dans le plan image, sont calculées. La fonction de mérite est définie par la somme des carrés de ces déviations calculées pour chaque point objet. On prend trois points : un point sur le bord du champ, un point sur l'axe et un troisième intermédiaire. D'autres conditions assurant que les limitations physiques ne sont pas dépassées, sont incluses également dans la fonction de mérite. Meiron suppose que le calcul est si près d'être achevé que seuls les changements dans les courbures doivent être considérés et que ces changements sont petits et sont conçus conformément aux courbures du système. Les seules conditions physiques qu'il a considérées comme importantes étant les limitations de la taille des courbures et le contrôle de la longueur focale image.

Si l'on suppose que la fonction de mérite $\overline{\Phi}$ dépend des paramètres du système $U_1, U_2, \dots, U_n$, une variation $\Delta \overline{\Phi}$ de $\overline{\Phi}$ due à une variation ΔU_i de U_i est donnée par :
$$\Delta \overline{\Phi} = \sum \left(\frac{\partial \overline{\Phi}}{\partial U_i} \right) \cdot \Delta U_i$$

à condition que les ΔU_i soient suffisamment petits. C'est le cas si : - 30 -

$$\Sigma (P_i \Delta U_i)^2 = \epsilon$$

où ϵ est une constante définie à l'avance et les P_i des facteurs importants qui servent à égaliser les intervalles de variabilité de U_i .

Il est démontré que les valeurs de ΔU_i qui entraînent la plus grande diminution de Φ sont donnés par :

$$\Delta U_i = -K \left(\frac{\partial \Phi}{\partial U_i} \right) / P_i^2,$$

ici, K est une constante positive. La fonction de mérite Φ peut maintenant être considérée comme une fonction à une seule variable le long du chemin de la plus grande descente, une condition supplémentaire, assurant que la distance focale image f' reste constante, est ajoutée.

Le système est maintenant divisé en m composantes, chaque composante étant un élément ou un groupe d'éléments à traiter ensemble. Les coefficients différentiels sont évalués comme suit :

Une petite quantité δp_i est ajoutée à toutes les courbures du i ème composant, et la valeur résultante de Φ est calculée. Ceci est également vrai pour $-\delta p_i$, on obtient $\frac{\partial \Phi}{\partial p_i}$ à partir des valeurs de Φ ainsi obtenues.

Une réduction plus grande de Φ peut être obtenue en ajustant la position du plan focal, c'est-à-dire en cherchant sa meilleure position.

Soit H_j la hauteur d'intersection d'un rayon dans le plan image et α_j l'angle entre le rayon et l'axe optique, la fonction de mérite obtenue en déplaçant le plan image de la quantité d s'écrit :

$$\Phi' = \Sigma [(H_j - H_o) - d (tg \alpha_j - tg \alpha_o)]^2$$

où l'indice zéro s'applique au rayon principal. De cette expression on extrait d en annulant la différentielle total de Φ' ; on obtient :

$$d = \frac{\Sigma (H_j - H_o) (tg \alpha_j - tg \alpha_o)}{\Sigma (tg \alpha_j - tg \alpha_o)}$$

Plus tard, ²⁸ Meiron décrit la méthode de moindre carré, comme une méthode générale s'avérant suffisante pour être appliquée aux premiers stades du calcul des combinaisons optiques, ainsi qu'à la réduction de leurs aberrations résiduelles. Ici les paramètres du système optique $U_1, U_2, \dots, U_n$ représentent les épaisseurs, les intervalles de séparation, les indices de réfraction, les dispersions et les courbures des dioptries. Les quantités $S_1, S_2, \dots, S_m$ représentent soit les aberrations comme cela est habituellement défini en optique géométrique, soit la différence entre la hauteur d'un rayon et celle du rayon principal approprié, comme décrit ci-dessus. On ajoute à ces termes d'aberration la condition de restriction de la longueur focale image, et

d'autres restrictions physiques applicables.

Considérons les S_i comme des fonctions des U_j

$$\delta S_i = \sum_j A_{ij} \delta u_j$$

où $A_{ij} = \frac{\partial S_i}{\partial u_j}$. Les δu_j sont choisis pour réduire

$$\sum_i \left(\sum_j A_{ij} \delta u_j - \delta S_i \right)^2$$

dont l'équation normale est :

$$A^t \cdot A \cdot \delta u = A^t \delta S$$

où A désigne la matrice (A_{ij}) ; A^t est la matrice transposée de A et δS est un vecteur colonne approprié.

La fonction de mérite est définie par $\Phi = \sum_i \alpha_i (\delta S_i)^2$ où les α_i forment un ensemble de facteurs de pondérations. Notons que la procédure de réduction de la fonction de mérite ne doit pas agir directement sur Φ mais sur la fonction dont il provient.

La procédure est utilisée à la fois pour la réduction des aberrations du troisième ordre où les S_i sont les aberrations de Seidel et pour la réduction des aberrations d'ordres supérieurs.

B - 5. Robert-E-Hopkins :

La partie la plus importante de son programme consiste à réduire les coefficients d'aberration de Seidel ²⁹ aux valeurs désirées, ou plutôt prédéterminées. Les paramètres du système sont modifiés l'un après l'autre. A chaque modification, on calcule un nouvel ensemble de coefficients d'aberration. Ensuite en utilisant la méthode des différentielles finies, la dérivée partielle de chaque coefficient d'aberration est calculée, les nouvelles valeurs des paramètres sont obtenues au moyen de la méthode de Newton. Ce procédé est réitéré jusqu'à ce que les valeurs désirées soient atteintes.

Une version récente de ce programme ^{30, 31} utilise des formules approximatives pour le calcul des dérivées partielles des coefficients d'aberration uniquement par rapport aux courbures. En modifiant ces courbures, les coefficients d'aberration sont amenés aux valeurs désirées. Les équations utilisées sont du type :

$$\sum_j \alpha_{ij} \Delta C_j = A_i \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (20)$$

où α_{ij} représente la dérivée partielle de la i ème aberration par rapport à la j ème courbure, ΔC_j est la variation de la j ème courbure et A_i , la différence entre la i ème aberration et la valeur désirée. Si $m > n$, on ajoute $(m - n)$,

condition relative aux courbures, pour le système d'équation (20). Le système d'équations final est alors résolu en donnant une nouvelle valeur de la courbure. On réitère le processus jusqu'à l'obtention des valeurs désirées.

Conclusion :

Dans cette partie, nous avons résumé quelques méthodes de calcul automatique des combinaisons optiques.

De ces dernières méthodes, il est possible de tirer une idée commune qui s'y trouve plus ou moins nettement exprimée : la qualité d'un système optique est caractérisée par la valeur numérique d'une fonction de mérite calculée à partir des termes d'aberration du système et d'une expression telle que sa variation traduit aussi fidèlement que possible, l'évolution de la qualité du système optique. Cette fonction s'annule généralement dans le cas d'un système parfait.

Cette définition numérique de la qualité d'une image peut paraître artificielle. Le choix de la fonction de mérite est en effet très délicat et aucune fonction n'est sans doute applicable à tous les systèmes optiques, mais si imparfaite qu'elle soit, cette traduction mathématique du problème physique permet sa mise en équation dans les conditions où l'emploi des ordinateurs est possible.

Le calcul des combinaisons optiques devient ainsi le problème de la recherche du minimum de la fonction de mérite par variation des éléments de construction.

C - PRINCIPE DE LA METHODE UTILISEE :

Supposons que le système optique à corriger soit défini par n paramètres x_j ($j = 1, 2, \dots, n$), et que sa performance soit caractérisée par m aberrations S_i ($i = 1, 2, \dots, m$). Corriger le système optique consiste à modifier ces n paramètres x_j , pour obtenir un nouveau système caractérisé par des aberrations S_i nulles, ou au moins inférieures (en valeurs absolues), que celles du système original.

En d'autres termes si $\vec{S} = (S_i) = (S_1, S_2, \dots, S_m)$ représente le vecteur des aberrations du système et $X = (X_j) = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ représente le vecteur des paramètres, et si on suppose que le vecteur des aberrations calculé à partir des paramètres de départ est donné par :

$$\vec{S}(\vec{X}_0) = (\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_m),$$

alors le problème est de trouver l'accroissement $\vec{\Delta X} = (\Delta X_j) = (\Delta X, \Delta X, \dots, \Delta X_n)$ des paramètres initiaux tel que :

$$\vec{S}(\vec{X}) = \vec{S}(\vec{X}_0 + \vec{\Delta X}) = \vec{0},$$

ou bien :

$$\vec{S}(\vec{X}) = \vec{S}(\vec{X}_0 + \vec{\Delta X}) = (S_i) = (S_1, S_2, \dots, S_m)$$

avec

$$|S_i| < |\delta_i|$$

La fonction $\vec{S}(\vec{X})$ peut être développée en série de Taylor en X_0

sous la forme suivante :

$$\vec{S}(\vec{X}) = \vec{S}(\vec{X}_0) + \frac{\partial \vec{S}}{\partial X} \cdot \vec{\Delta X} + \frac{\partial^2 \vec{S}}{\partial X^2} \Delta \vec{X}^2 + \dots$$

on suppose que la variation $\vec{\Delta X}$ est assez faible pour que le développement puisse se limiter aux termes de degré 0 et 1. Cette hypothèse est capitale pour obtenir une approximation linéaire des termes d'aberration en fonction des petites variations données aux éléments de construction du système tel que :

$$\vec{S}(\vec{X}) = \vec{S}(\vec{X}_0) + \frac{\partial \vec{S}}{\partial X} \cdot \vec{\Delta X},$$

elle apparaît justifiable dans le cas de l'oeil schématique, compte tenu des calculs effectués sur le cristallin artificiel que l'on trouve dans la littérature.

Ainsi, le problème se ramène à la résolution de l'équation :

$$\vec{S}(\vec{X}_0) + \frac{\partial \vec{S}}{\partial X} \cdot \vec{\Delta X} = 0 \quad (21)$$

ou $\vec{S}(\vec{X}_0)$ est un vecteur colonne :

$$\begin{pmatrix} \delta_1 \\ \delta_2 \\ \vdots \\ \delta_m \end{pmatrix} \quad \text{et} \quad \vec{\Delta X} = \begin{pmatrix} \Delta X_1 \\ \Delta X_2 \\ \vdots \\ \Delta X_n \end{pmatrix}$$

$$\frac{\partial \vec{S}}{\partial X} = \begin{pmatrix} \frac{\partial S_1}{\partial X_1} & \dots & \frac{\partial S_1}{\partial X_n} \\ \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial S_m}{\partial X_1} & \dots & \frac{\partial S_m}{\partial X_n} \end{pmatrix} = J$$

donc l'équation (21) s'écrit sous la forme :

$$\vec{S}(X_0) + J \cdot \Delta \vec{X} = 0 \quad (22)$$

si $n = m$, la solution de cette équation nécessite l'inversion de J . Cependant, assez souvent, cette matrice est si mal conditionnée que cette approche est infaisable. Toutefois, avec $n > m$, il est possible d'appliquer la technique des moindres carrés ³² à cette équation (22). Ainsi, en multipliant l'équation (22) par la transposée de J , on obtient :

$$J^t \cdot \vec{S}(X_0) + J^t \cdot J \cdot \Delta \vec{X} = 0$$

Ensuite, en multipliant par la matrice inverse de $(J^t \cdot J)$, on obtient :

$$(J^t \cdot J)^{-1} \cdot J^t \cdot \vec{S}(X_0) + \Delta \vec{X} = 0$$

La solution finale est donnée par :

$$\Delta \vec{X} = - (J^t \cdot J)^{-1} \cdot J^t \cdot \vec{S}(X_0) \quad (23)$$

Les valeurs de $\vec{X}$ tel que $\vec{X} = \vec{X}_0 + \Delta \vec{X}$ ainsi obtenues donnent aux fonctions d'aberration du système des valeurs plus petites que celles de départ et la fonction de mérite Φ définie par :

$$\Phi = \sum_{i=1}^m P_i S_i^2$$

prend une valeur minimum, P_i étant le facteur de pondération.

Finalement cette méthode a été choisie dans le calcul du cristallin parce qu'elle est facilement numérisable et conduit à une amélioration de la qualité de l'image.

D - CALCUL D'UNE LENTILLE :

D - 1. Détermination des paramètres initiaux de la lentille :

Dans un avant projet, sous réserve de certaines hypothèses simplificatrices, les éléments de construction de départ sont déterminées :

a) Rayon de courbure de la face avant :

Le rayon de courbure de la face avant est égal à celui du cris-

tallin de l'oeil schématique : $R_3 = 10,2 \text{ mm}$

b) L'indice de réfraction :

La lentille est fabriquée à partir de méthylméthacrylate, matière transparente de densité égale à 1,18 à 20°C, -son spectre de transmission s'étend de part et d'autre du visible. Ses caractéristiques optiques sont :

b - 1) l'indice de réfraction est égal à $n_4 = 1,49166$

b - 2) sa contraingence v est égale à $v = 57,37$

c) L'épaisseur de la lentille :

Compte tenu de la petitesse du cristallin humain, l'épaisseur de la lentille doit être mince : $e_3 = 0,6 \text{ mm}$

d) Rayon de courbure de la face arrière :

Le rayon de courbure de la face arrière est donné par la formule:

$$R_4 = \frac{e_3}{n_4} \frac{(n_5 - n_4) (n_4 - n_3) \rho_3}{D_k^h - \rho_3 (n_4 - n_3)}$$

avec D_k^h : puissance du cristallin de l'oeil schématique

$$D_k^h = 21,78 \text{ dpt.}$$

n_3, n_5 : indices de réfractions de l'humeur aqueuse et le corps vitré.

ρ_3 : courbure de la face avant de la lentille.

Donc, la lentille baigne entre deux milieux d'indice n_3 , et n_5 , et possède une puissance égale à la puissance du cristallin de l'oeil schématique.

Il s'agit ensuite d'apporter les corrections finales aux différents paramètres dont on dispose déjà de valeurs plus ou moins approchées, pour obtenir une lentille qui corrige au mieux l'oeil schématique aphaque et qui joue le même rôle optique que le cristallin de l'oeil.

D - 2. Définition et calcul des termes d'aberration.

La lentille de départ ayant été choisie, l'oeil schématique aphaque équipé de cette lentille constitue le système optique à corriger. Les para-

mètres variables du systèmes sont :

- les deux rayons de courbure
- et l'épaisseur de la lentille.

On suppose fixes tous les autres paramètres de l'oeil, et même la position de la lentille (à 3,6mm de la face avant de la cornée).

Il s'agit de déterminer les valeurs de ces trois paramètres, afin d'obtenir une correction optimum, en maintenant rigoureusement fixes toutes les constantes optiques du système. Pour ceci, on applique la méthode de correction des systèmes optiques mentionnée au paragraphe (II - C), en prenant comme termes d'aberrations du troisième ordre : coefficient d'aberrations géométriques et chromatiques et en plus des conditions additionnelles qui consistent à maintenir les constantes optiques de l'oeil corrigé, égales aux constantes optiques de l'oeil schématique.

D - 2 - 1. Calcul des coefficients d'aberration du troisième ordre.

On trace deux rayons :

- un rayon marginal (1) issu du point objet sur l'axe et qui passe par le bord de la pupille d'entrée de l'oeil (Fig. II-10).
- un rayon pupillaire (2) issu du bord du champ et qui passe par le centre de la pupille d'entrée (Fig. II-10).

Ces deux rayons fournissent tous les éléments nécessaires au calcul des coefficients d'aberration du troisième ordre, en même temps que la position exacte de l'image paraxiale -notation employée dans le calcul de la marche des rayons :

	:	:
	: Rayon (1)	: Rayon (2)
	-----	-----
	:	:
Hauteurs d'incidences sur les différents	:	:
dioptries.....	: h_i	: k_i
	:	:
Angles d'incidences.....	: T_i	: J_i
	:	:
Angles des rayons avec l'axe.....	: U_i	: V_i
	:	:

a) Formules pour le calcul des équations de réfraction et de transfert.

- Equations de réfraction

$$U_{i+1} = h_i \rho_i (1 - m_i) + m_i \cdot U_i$$

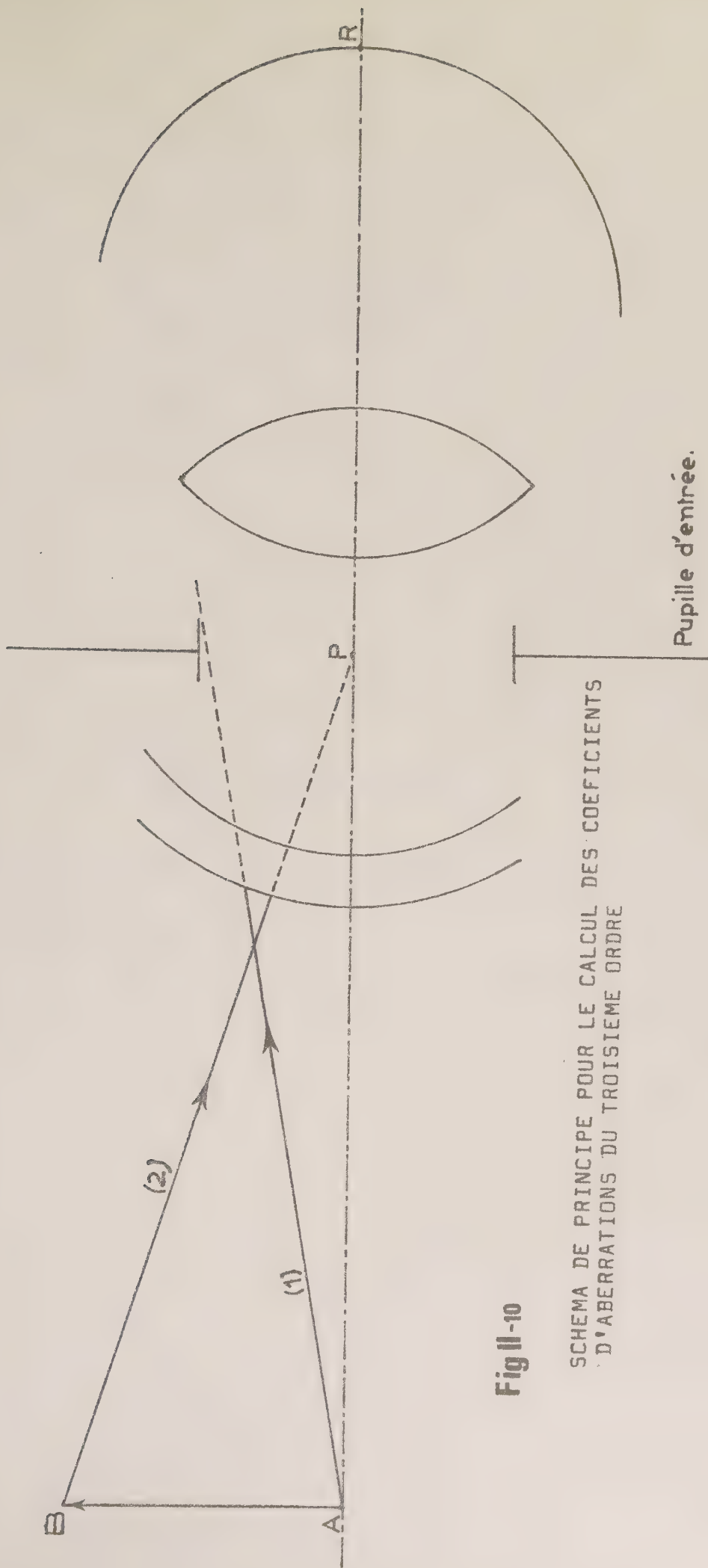


Fig II-10

SCHEMA DE PRINCIPE POUR LE CALCUL DES COEFFICIENTS
D'ABERRATIONS DU TROISIEME ORDRE

$$V_{i+1} = K_i \rho_i (1 - m_i) + m_i V_i$$

avec :

$$m_i = \frac{n_i}{n_{i+1}}, \text{ rapport des indices.}$$

$$\rho_i = 1/R_i, \text{ courbure du dioptr } i.$$

- Equations de transferts

$$h_{i+1} = h_i - e_i U_{i+1}$$

$$k_{i+1} = k_i - e_i V_{i+1}$$

avec e_i intervalle entre le dioptr (i) et le dioptr ($i + 1$).

b) Formules pour le calcul des coefficients du troisième ordre.

On calcule pour chaque dioptr les quantités :

$$T_i = \rho_i h_i - U_i \qquad J_i = k_i \rho_i - V_i$$

$$P_i = (m_i - 1) \frac{\rho_i}{n_i} \qquad (\text{coefficient de Petzval})$$

$$A_i = \frac{n_i h_i}{2I_i} (U_{i+1} - T_i) (1 - m_i)$$

$$I_i = n_{i+1} (U_{i+1} \cdot k_i - V_{i+1} \cdot h_i) = n_i (U_i \cdot k_i - V_i \cdot h_i)$$

I_i : invariant de Lagrange.

Ensuite, les coefficients d'aberration sont donné par le tableau IV.

TABLEAU IV

Coefficients d'aberration	Formules
Aberration sphérique.....	$S_1 = \sum_{i=1}^N A_i \cdot T_i^2$
Coma.....	$S_2 = \sum_{i=1}^N A_i T_i J_i$
Astigmatisme.....	$S_3 = \sum_{i=1}^N A_i J_i^2$
Courbure de champ.....	$S_4 = \sum_{i=1}^N (A_i J_i^2 + \frac{1}{2} P_i I_i)$
Distortion.....	$S_5 = \sum_{i=1}^N (A_i J_i^2 + \frac{1}{2} P_i I_i) \cdot \frac{J_i}{T_i}$
Chromatisme de position.....	$S_6 = \sum_{i=1}^N h_i T_i (\Delta n_i - \Delta n_{i+1})$
Chromatisme de grandeur.....	$S_7 = \sum_{i=1}^N h_i J_i (\Delta n_i - m_i \Delta n_{i+1})$

Avec Δn_i dispersion du milieu d'indice n_i
 N : nombre des dioptries
Ces formules sont empruntées à André GIRARD (5)

D - 2 - 2. Calcul des termes additionnels d'aberration

Pour s'approcher le plus possible des conditions optiques qui réalisent le cristallin humain, on a imposé sur l'oeil corrigé par un cristallin artificiel des conditions supplémentaires laissant l'oeil corrigé très proche de l'oeil schématique. L'absence de ces conditions se traduit par des termes additionnels d'aberration. Ces termes d'aberration sont :

a - L'écart entre la puissance de la lentille et la puissance du cristallin de l'oeil schématique

La puissance du cristallin artificiel doit-être égale à la puissance du cristallin de l'oeil schématique et l'écart entre les deux puissances constitue le premier terme additionnel d'aberration tel que :

$$S_8 = D_k^p - D_k^h$$

avec

$$D_k^p = \rho_3 (n_4 - n_3) + \rho_4 (n_5 - n_4) - \frac{e_3}{n_4} (n_4 - n_3)(n_5 - n_4)\rho_3\rho_4$$

D_k^h : puissance du cristallin de l'oeil schématique.

b - L'écart dû au déplacement des plans principaux

Un déplacement des plans principaux de l'oeil corrigé par rapport à l'oeil normal (c'est le cas par exemple d'une aphaque unilatérale) produit une différence de taille entre l'image obtenue par l'oeil corrigé, et l'image obtenue par l'oeil normal. Défaut ennuyeux, notamment lorsqu'il dépasse 8 à 10 %. Pour tourner cette difficulté on a constaté qu'on a intérêt à placer les plans principaux dans les mêmes positions dans les deux cas, c'est-à-dire dans l'oeil corrigé comme dans l'oeil normal. Pour ce faire, il faut que :

- l'interstice de la lentille soit égal à celui de l'oeil schématique ;

- l'intervalle entre la plan principal image de la cornée et le plan principal objet de la lentille soit le même dans l'oeil corrigé que dans l'oeil schématique.

Ainsi on aura deux termes d'aberration de plus, qu'on exprime par :

b.1. Terme d'aberration dû aux interstices

L'interstice de la lentille (Fig. I.4) est donné par :

$$\overline{H_k^p H_k^{p'}} = \overline{S_3 S_4} - \overline{S_3 H_k^p} - \overline{H_k^{p'} S_4}$$

avec

$$\overline{S_3 H_k^p} = \frac{n_3}{n_4} \cdot \frac{e_3}{D_k^p} \cdot \rho_4 (n_5 - n_4)$$

$$\overline{S_4 H_k^{p'}} = - \frac{n_5}{n_4} \cdot \frac{e_3}{D_k^p} \cdot \rho_3 (n_4 - n_3)$$

d'où

$$\overline{H_k^p H_k^{p'}} = e_3 - \frac{n_3}{n_4} \frac{e_3}{D_k^p} \rho_4 (n_5 - n_4) - \frac{n_5}{n_4} e_3 \rho_3 \frac{(n_4 - n_3)}{D_k^p}$$

L'interstice de l'oeil schématique vaut :

$$\overline{H_k^h H_k^{h'}} = 0,18mm,$$

et l'écart entre les deux interstices est :

$$S_9 = \overline{H_k^p H_k^{p'}} - \overline{H_k^h H_k^{h'}}$$

b.2. Termes d'aberration dû aux intervalles

L'intervalle entre le plan principal image de la cornée et le plan principal objet de la lentille (Fig. I.4) est donné par :

$$\overline{H'_c H_k^p} = - \overline{S_2 H'_c} + \overline{S_2 S_3} + \overline{S_3 H_k^p}$$

ou

$$\overline{S_2 H'_c} = - \frac{n_3}{n_2} \rho_1 \frac{(n_3 - n_2)}{D_c}$$

D_c : puissance totale de la cornée.

L'intervalle $\overline{H'_c H_k^h}$ dans le cas de l'oeil schématique est égal à 6,08 mm.

L'écart entre les deux intervalles vaut :

$$S_{10} = \overline{H'_c H_k^p} - \overline{H'_c H_k^h}$$

c - L'écart entre la puissance de l'oeil schématique et la puissance de l'oeil corrigé par la lentille

Enfin pour maintenir la puissance totale de l'oeil corrigé égale à la puissance totale de l'oeil schématique il faut satisfaire la condition :

$$S_{11} = D_o^p - D_o^h$$

où

$$D_o^p = D_c^h + D_k^p - \frac{\overline{H'_c H_k^p}}{n_4} \cdot D_c^h \cdot D_k^p$$

est la puissance de l'oeil équipé par la lentille et D_o^h la puissance de l'oeil schématique.

Donc on dispose finalement d'un vecteur aberration qui contient 11 composantes : 7 composantes représentent les aberrations géométriques et chromatiques de l'oeil ($S_1, S_2, \dots, S_7$) et 4 composantes (S_8, S_9, S_{10}, S_{11}) qui représentent les termes additionnels d'aberration.

D'où

$$S = \begin{pmatrix} S_1 \\ S_2 \\ . \\ . \\ . \\ S_{11} \end{pmatrix}$$

D.3. Description du programme de calcul

X : vecteur des paramètres considérés comme variables, il contient au départ les paramètres initiaux du système.

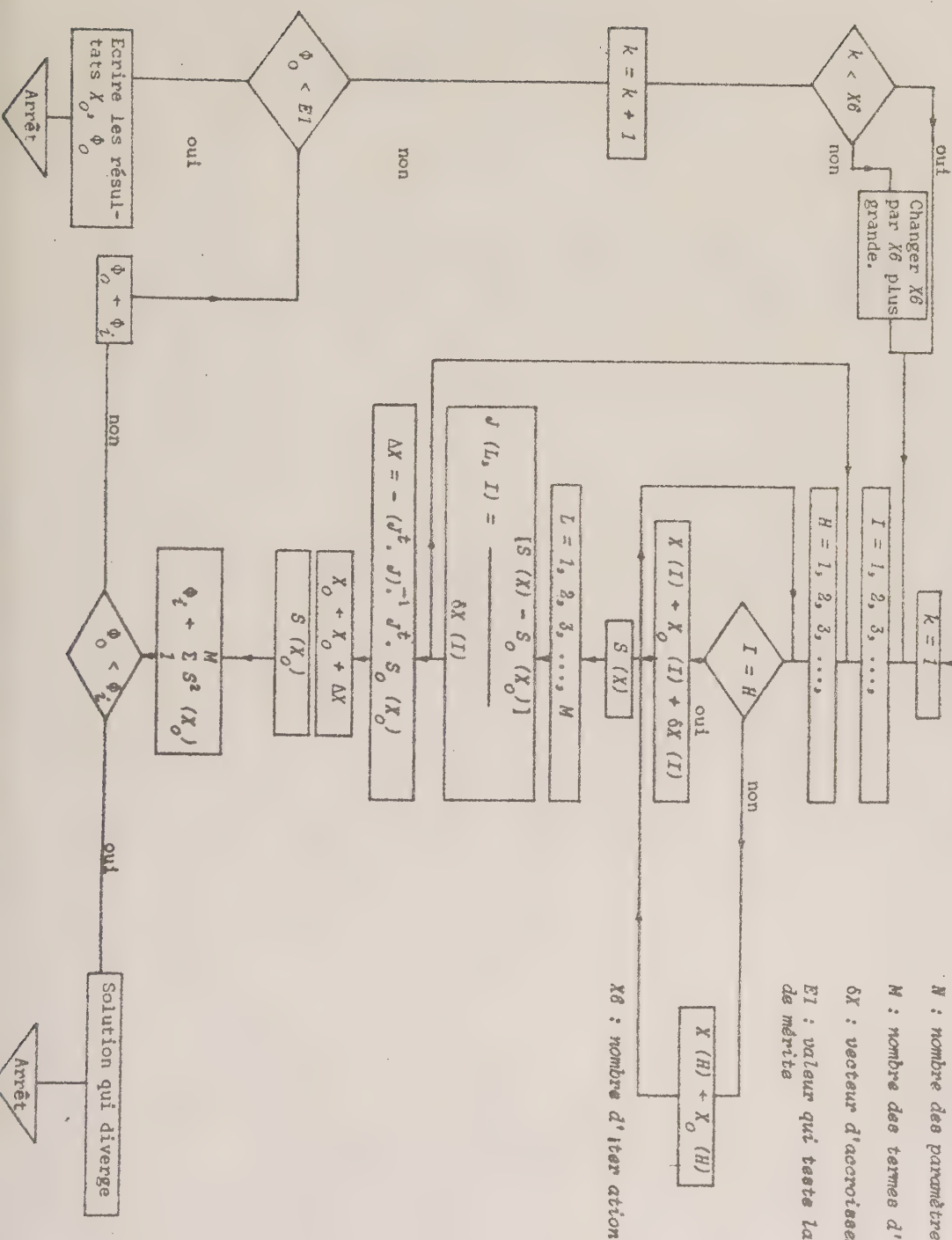
 k : compteur d'iteration

N : nombre des paramètres variables

M : nombre des termes d'aberration

δx : vecteur d'accroissement finis

El : valeur qui teste la fonction de mérite



D - 3 - 2. Listing du programme

```

10 DIM P(12,18),J(11,3),D(11)
11 DIM F(3),S(5)
20 DIM W(11,3),U(3,11),T(3,3),O(3,3),L(3,11),X(3)
30 REM* L'ENTREE DES ELEMENTS CARACTERISTIQUES: OPTIQUES ET GEOMETRIQUES
31 REM: DE L'OEIL SCHEMATIQUE
50 FOR K=1 TO 3
60 FOR I=1 TO 12
70 READ P(I,K)
80 NEXT I
90 NEXT K
100 DATA 0,.0077,.0077,.00857,.0099,0,-.00061,.00608,42.38,59.94,.00018
110 DATA 21.78,1,1.3771,1.3374,1.49166,1.336,0,0,0,0,0,0
120 DATA .005,.005,.0045,.0045,0,.00304,.02420,.0004,0,0,0,0
130 FOR I=1 TO 4
140 LET P(I,4)=P(I,2)/P(I+1,2)
150 NEXT I
180 FOR K=5 TO 6
190 FOR I=1 TO 4
200 READ P(I,K)
210 NEXT I
220 NEXT K
230 DATA 128.20513,153.84615,98.0392,-166.6666
240 DATA .00055,.00305,.0006,.02
241
241 LET F(12,15)=(F(3,6)/F(4,2))*(F(4,2)-F(3,2))*F(3,5)*(F(5,2)-F(4,2))
242 LET F(12,15)=F(5,2)-F(4,2)-F(12,15)
243 LET P(12,15)=(P(12,1)-F(3,5)*(F(4,2)-F(3,2)))/F(12,15)
244 LET R4=1/P(12,15)
245 PRINT "SOLUTION DONNEE PAR L'OPTIQUE PARAXIALE"
246 PRINT "R4":TAB(10);R4
247 PRINT "METHODE DE MOINDRE CARREES"
248 PRINT TAB(4);"Q0":TAB(26);"Q1":TAB(40);"X1":TAB(60);"X2":TAB(70);K
271 LET X(1)=98.0392
272 LET X(2)=P(12,15)
273 LET X(3)=.0006
290 REM: L'ENTREE DES PARAMETRES X6, ET E1
305 LET D1=0
306 LET U1=30*3.141592/180
307 LET H0=.004
308 LET E1=.00000000001
309 LET X6=1E+3
310 REM : DEFINITION DU VECTEUR P(1,7) DONT LES COMPOSANTES SONT LES
311 REM ACCROISSEMENTS FINIS
312 INPUT X1,X2
320 LET P(1,7)=X(1)*X1
330 LET P(2,7)=X(1)*X1
345 LET P(3,7)=P(7,3)*X2
350 REM:
350 REM: CALCUL DES HAUTEURS D'INCIDENCES : DU RAYON M ET DU RAYON
351 REM: PP AVEC LE 1° DIOPTRE
353 REM CALCUL DES HAUTEURS D'INCIDENCES DU RAYON M ET DURP
354 REM : SUR LE 1° DIOPTRE
355 LET P(1,10)=U1
356 LET P(1,12)=U1
357 REM : HAUTEUR D'INCIDENCE DU RM SUR LE 1° DIOPTRE
359 LET P(1,11)=H0-P(6,3)*P(1,10)
360 REM CAS OU L'OBJET ET A L'INFINI ; LE RAYON M EST PARALLELE A
361 REM L'AXE OPTIQUE
363 LET P(1,13)=P(6,3)*P(1,12)

```



```

71 REM :*****LA BOUCLE D'ETERATION *****
72 FOR K=1 TO %6
73 REM :DEFINITION DU VECTEUR P(I,8) ET P(I,8)+P(I,7)*****
74 LET Y=0
75 LET Y=Y+1
76 FOR I=1 TO 3
77 IF I<Y THEN 450
78 LET P(I,8)=X(I)+P(I,7)
79 GO TO 460
80 LET P(I,8)=X(I)
81 NEXT I
82 GO SUB 2010
83 IF
84 IF Y<4 THEN 400
85 REM :FORMATION DE LA MATRICE J(11,5) *****
86 FOR H=1 TO 3
87 FOR I=1 TO 11
88 LET J(I,H)=(W(I,H)-D(I))/F(H,7)
89 NEXT I
90 NEXT H
91 REM CALCUL DES PETITES VARIATINS QU'IL FAUT AJOUTER AUX
92 REM ELEMENTS DE CONSTRUCTIONS DE DEPARTS ET LE CALCUL
93 REM DE LA FONCTION DE MERITE *****
94 REM:FORMATION DE LA MATRICE J TRANSPOSEE =U(5,11)*****
95 FOR I=1 TO 11
96 FOR H=1 TO 3
97 LET U(H,I)=J(I,H)
98 NEXT H
99 NEXT I
100 REM PRODUIT DE J TRANSPOSE PAR J :U(5,11)*J(11,5)=T(5,5)
101 FOR I=1 TO 3
102 FOR H=1 TO 3
103 LET T(I,H)=0
104 FOR O=1 TO 11
105 LET T(I,H)=T(I,H)+U(I,O)*J(O,H)
106 NEXT O
107 N
108 NEXT H
109 NEXT I
110 REM :CALCUL DE L'INVERCE DE LA MATRICE T :C(5,5)
111 MAT C=INV(T)
112 REM: CALCUL DE L(5,11)*****
113 FOR I=1 TO 3
114 FOR H=1 TO 11
115 LET L(I,H)=0
116 FOR O=1 TO 3
117 LET L(I,H)=L(I,H)+C(I,O)*U(O,H)
118 NEXT O
119 NEXT H
120 NEXT I
121 REM :CALCUL DE F(5)*****
122 FOR I=1 TO 3
123 LET F(I)=0
124 FOR H=1 TO 11
125 LET F(I)=F(I)+L(I,H)*D(H)
126 NEXT H
127 NEXT I
128 REM :CALCUL DE F(I)=(-1)*F(I)
129 FOR I=1 TO 3
130 LET F(I)=(-1)*F(I)
131 NE
132 NEXT I

```



```

1000 REM :CALCUL DE LA FONCTION DE MERITE INITIALE:00*****
1010 LET Q0=0
1020 FOR I=1 TO 11
1030 LET Q0=Q0+D(I)^2
1040 NEXT I
1050 REM :STOCKAGE DES ELEMENTS DE CONSTRUCTIONS DE DEPART FOUR CHAQUE
1061 REM:      ETERRATION K:
1063 FOR I=1 TO 3
1064 LET S(I)=F(I,8)
1065 NEXT I
1066 LET S(4)=P(12,2)
1067 LET S(5)=P(10,2)
1069 REM :NOUVELLES ELEMENTS DE CONSTRUCTINS:
1070 FOR I=1 TO 3
1080 LET F(I,8)=P(I,8)+.1*F(I)
1090 NEXT I
1100 REM :CALCUL DE LA MATRICE D(11) AVEC LES NOUVELLES ELEMENTS DE
1101 REM      CONSTRUCTIONS
1110 GO SUB 2010
1120 REM :CALCUL DE LA NOUVELLE FONCTION DE MERITE *****
1130 LET Q1=0
1140 FOR I=1 TO 11
1150 LET Q1=Q1+D(I)^2
1160 NEXT I
1170 IF Q0<Q1 THEN 1200
1180 IF Q1<E1 THEN 1220
1181 FOR I=1 TO 3
1182 LET X(I)=P(I,8)
1183 NEXT I
1190 NEXT K
1200 GOTO 1221
1220 PRINT "CHANGER E1 PAR E1' PLUS PETITE "
1221 PRINT "Q0=";Q0;"Q1=";Q1;P(12,2);P(10,2)
1222 PRINT "F(I,8)=";F(1,8);F(2,8);F(3,8)
1223 PRINT "X1=";X1;"X2=";X2;"K=";K
1224 PRINT "#####"
1230 STOP

```

```

2000 REM:LE SOUS PROGRAMME QUI CALCUL LES COEF      D'ABERRATIONS
2010 LET F(3,5)=P(1,8)
2020 LET F(4,5)=P(2,8)
2040 LET F(3,6)=P(3,8)
2060 FOR I=1 TO 11
2070 LET F(I,9)=0
2080 NEXT I
2090 REM:CALCUL DES EQUATION DE REFRACTIONS ET DE TRANSFERTS
2100 FOR H=11 TO 13 STEP 2
2190 FOR I=1 TO 4
2200 LET F(I+1,H-1)=P(I,5)*(1-P(I,4))*F(I,H)+P(I,4)*F(I,H-1)
2210 LET F(I+1,H)=P(I,H)-P(I,6)*F(I+1,H-1)
2220 NEXT I
2230 NEXT H
2350 REM:CONTROLE DES HAUTEURES D'INCIDENCES P(I,11) ET P(I,13)
2360 FOR I=1 TO 4
2370 IF P(I,11)>P(I,3) THEN 3060
2380 IF P(I,13)>P(I,3) THEN 3060
2390 NEXT I
2400 REM :CALCUL DES COEF D'ABERRATIONS F(I,9)
2410 FOR I=1 TO 4
2420 REM :F(I,14):LES ANGLES D'INCIDENCES DU RAYON M
2430 LET P(I,14)=P(I,11)*P(I,5)-P(I,10)
2440 R
2440 REM:F(I,15):TERME DE PETZUEL*****
2450 LET P(I,15)=(P(I,5)/P(I,2))*(P(I,4)-1)
2460 REM:F(I,16): INVARIANT DE LAGRANGE*****
2470 LET F(I,16)=P(I+1,2)*(F(I+1,10)*F(I,13)-P(I+1,12)*P(I,11))
2480 LET X8=(1-P(I,4))*(F(I+1,10)-P(I,14))*F(I,2)*F(I,11)

```



```

490 LET P(1,17)=(X8/(2*P(1,16)))
500 REM : P(1,18): L'ANGLE D'INCIDENCE DU RP
510 LET P(1,18)=P(1,13)*P(1,5)-P(1,12)
520 NEXT I
530 REM: *****SOMMES DES COEF D'ABERRATIONS*****
540 FOR I=1 TO 4
550 REM:*****L'ABERRATION DE SPHERICITE*****
560 LET P(1,9)=P(1,9)+P(1,17)*P(1,14)^2
570 REM:*****LABERR DE COMA P(2,9)*****
580 LET P(2,9)=P(2,9)+P(1,17)*P(1,18)*P(1,14)
590 REM: *****ASTIGMATISME***P(3,9)*****
600 LET P(3,9)=P(3,9)+P(1,17)*(P(1,18)^2)
610 REM:*****COURBURE DE CHAMP***P(4,9)*****
620 LET P(4,9)=P(4,9)+P(1,17)*P(1,18)^2+.5*P(1,15)*P(1,16)
630 REM:*****DISTORTION***P(5,9)*****
635 LET Z9=(P(1,17)*P(1,18)^2+.5*P(1,15)*P(1,16))*(P(1,18)/P(1,14))
640 LET P(5,9)=P(5,9)+Z9
650 REM : LABERR CHROMATIQUE DE POSITION***P(6,9)*****
660
670 LET P(6,9)=P(6,9)+P(1,14)*(P(1,1)-P(1,4)*P(I+1,1))*P(1,11)
670 REM*****L'ABERR CHROMATIQUE DE GRANDEURS***P(7,9)*****
680 LET P(7,9)=P(7,9)+P(1,11)*P(1,18)*(P(1,1)-P(1,4)*P(I+1,1))
690 NEXT I
700 REM: TERMES D'ABERRATIONS ADDITIONNELLES:
710 LET P(9,3)=P(3,5)*(P(4,2)-P(3,2))
720 LET P(10,3)=P(4,5)*(P(5,2)-P(4,2))
730 LET P(12,3)=P(9,3)+P(10,3)-(P(3,6)/P(4,2))*P(9,3)*P(10,3)
740 REM : PUISSANCE DU CRISTALLIN ARTIFICIEL
750 LET P(12,2)=P(12,3)
760 REM ECART ENTRE LA PUISSANCE DU CRISTALLIN ARTIFICIEL ET LA
770 REM PUISSANCE DU CRISTALLIN DE L'OEIL SCHEMATIQUE
780 LET P(10,9)=P(12,2)-P(12,1)
790 REM : CALCUL DE L'INTERSTICE DU CRISTALLIN ARTIFICIEL
800 LET Z1=P(3,2)*P(3,6)*P(10,3)*(1/(P(4,2)*P(12,2)))
810 LET Z2=-P(5,2)*P(3,6)*P(9,3)*(1/(P(4,2)*P(12,2)))
820 LET P(11,2)=-Z1+P(3,6)+Z2
830 REM : L'ECART ENTRE LES DEUX INTERSTICES : DU CRISTALLIN ARTIFICIEL
840 REM ET DU CRISTALLIN DE L'OEIL SCHEMATIQUES
850 LET P(11,9)=P(11,2)-P(11,1)
860 REM : CALCUL DE L'INTERSTICE ENTRE LE PP IMAGE DE LA CORNEE
861 REM ET LE PP OBJET DU CRISTALLIN ARTIFICIEL
870 LET P(8,2)=-P(7,1)+P(2,6)+Z1
880 REM ECART ENTRE LES 2 INTERSTICES
890 LET P(8,9)=P(8,2)-P(8,1)
900 REM : CALCUL DE LA PUISSANCE TOTALE DE L'OEIL EQUIPE D'UN
910 REM CRISTALLIN ARTIFICIEL
920 LET P(10,2)=P(9,1)+P(12,2)-(P(8,2)/P(3,2))*P(9,1)*P(12,2)
930 REM ECART ENTRE LES 2 PUISSANCES
940 LET P(9,9)=P(10,2)-P(10,1)
950 REM : FORMATION DE LA MATRICE W(11,5)
960 IF Y>3 THEN 3020
970 FOR I=1 TO 11
980 LET W(I,Y)=P(I,9)
990 NEXT I
1000 RETURN
1010 REM : FORMATION DE LA MATRICE D(11)*****
1020 FOR I=1 TO 11
1030 LET D(I)=P(I,9)
1040 NEXT I
1050 RETURN
1060 PRINT "H=";P(1,11),"K=";P(1,13),"I=";I
1070 STOP
1080 END

```


D - 3 - 3. Déroulement du calcul

Toutes les données qui décrivent les particularités de l'oeil sont transmises à l'ordinateur sous forme numérique.

Après avoir calculé les termes d'aberration du système initial $\vec{S}_0 = (s_1, s_2, \dots, s_m)$, et la fonction de mérite de départ $\Phi_0 = \sum_{i=1}^m s_i^2$, on modifie numériquement, par une quantité δx_1 arbitraire mais très faible, la valeur du premier paramètre de départ choisi comme variable, et on détermine par les mêmes formules les nouveaux termes d'aberration $\vec{S} = (S_1, S_2, \dots, S_m)$. Puis on recommence l'opération en remplaçant seulement cette fois, le deuxième paramètre x_2 par $x_2 + \delta x_2$, ainsi de suite.... La modification de n paramètres choisis comme variables permet d'obtenir n systèmes $\vec{S}_I, \vec{S}_{II}, \dots, \vec{S}_n$ qui diffèrent de $\vec{S}_0$ par un seul élément. L'ensemble des systèmes $\vec{S}_I, \vec{S}_{II}, \dots, \vec{S}_n$ sont mémorisés dans la matrice W(11,3), le système de départ $\vec{S}_0$ est mémorisé dans le vecteur D(11) (cf. listing page 437). On calcule ensuite la matrice J, formée à partir des dérivées partielles et pour cela il suffit de faire le rapport de l'accroissement des termes d'aberration à l'accroissement de la variable. L'équation (23) est résolue, conduisant à un nouveau système.

- Soit $E1$ représentant la valeur numérique de la fonction de mérite qui correspond à une solution satisfaisante avec $E1 = \epsilon$ (ϵ , infiniment petit).

- Soit Φ_0 représentant la valeur initiale, et Φ_i la valeur intermédiaire.

Si $\Phi_i \leq E1$, le calcul est considéré comme complet et l'ordinateur s'arrête ; de même si $\Phi_0 < \Phi_i$ la solution diverge et l'ordinateur s'arrête aussi. Si $\Phi_0 > \Phi_i > E1$, le nouveau système remplace l'ancien et le cycle se répète.

D.4. Détermination de l'intervalle de variabilité des accroissements finis δx_j . Choix de la solution finale.

La résolution de l'équation (23) exige l'établissement de la matrice J, et, par suite, le calcul des dérivées partielles $(\delta S_i / \delta x_j)$, où δx_j est une variation arbitraire à attribuer à chacun des paramètres du système. En effet, la solution obtenue par cette équation varie avec le choix de δx_j , or cette dernière doit se tenir entre deux limites, l'une assez faible pour que la

dérivée partielle du premier ordre intervienne seule, l'autre assez grande pour que cette dérivée soit calculable avec une bonne approximation ; il faut donc déterminer l'intervalle de variation de δx_j tel que les solutions obtenues par l'équation (23) soient stables. Pour ceci on a établi des courbes qui présentent la stabilité des paramètres du système en fonction de δx_j . Pour le tracé de ces courbes, on procède de la manière suivante :

1 - on définit les accroissements finis relatifs aux courbures :

$$\begin{aligned}\delta x_1 &= \rho_3^0 X1 \\ \delta x_2 &= \rho_3^0 X2\end{aligned}$$

où ρ_3^0 est la courbure initiale de la lentille

$X1$ un paramètre qui varie entre 10^{-5} et 10^{-1} .

L'accroissement fini relatif à l'épaisseur est alors :

$$\delta x_3 = l \cdot X2$$

où l désigne la longueur axiale de l'oeil schématique et $X2$ le paramètre qui prend respectivement les valeurs numériques suivantes : 10^{-1} , 10^{-2} , 10^{-3} , 10^{-4} , 10^{-5} .

2 - On trace pour chaque valeur fixe de $X2$ les courbes :

$$\rho_3 = \rho_3 (\delta x_1)$$

$$\rho_4 = \rho_4 (\delta x_1)$$

$$e_3 = e_3 (\delta x_1)$$

L'ensemble des figures II.11.a,b,c,d,e, obtenues pour les différentes valeurs de $X2$ présentent l'allure de variation des paramètres en fonction des accroissements finis. A partir de ces figures, on extrait l'intervalle dans lequel les paramètres de construction ont une stabilité suffisante. Cet intervalle est déterminé pour $X2 = 10^{-3}$ et $X1$ varient entre $3 \cdot 10^{-3}$ et $5 \cdot 10^{-3}$. On retiendra finalement la solution pour laquelle on a :

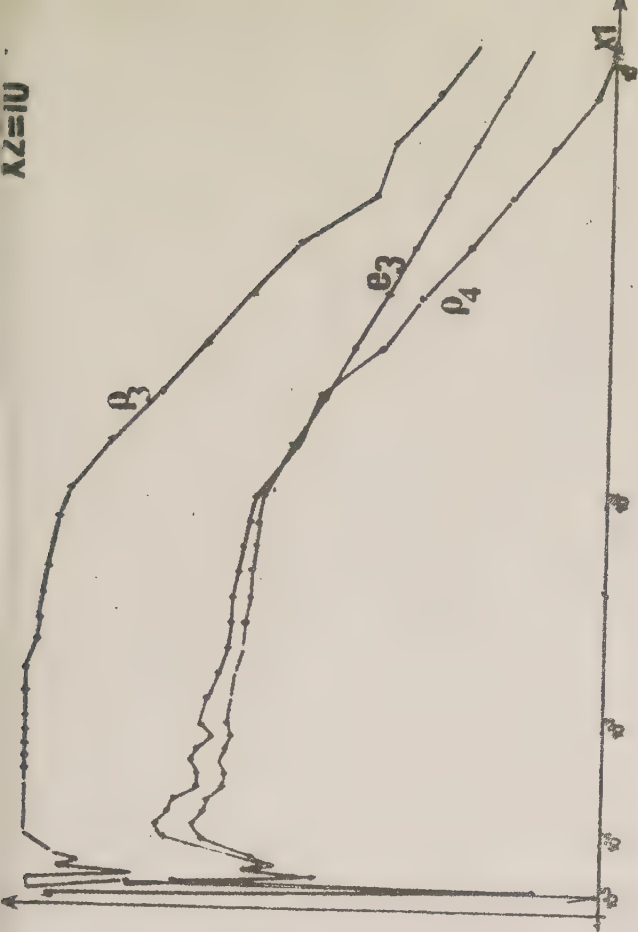


Fig II-11-a

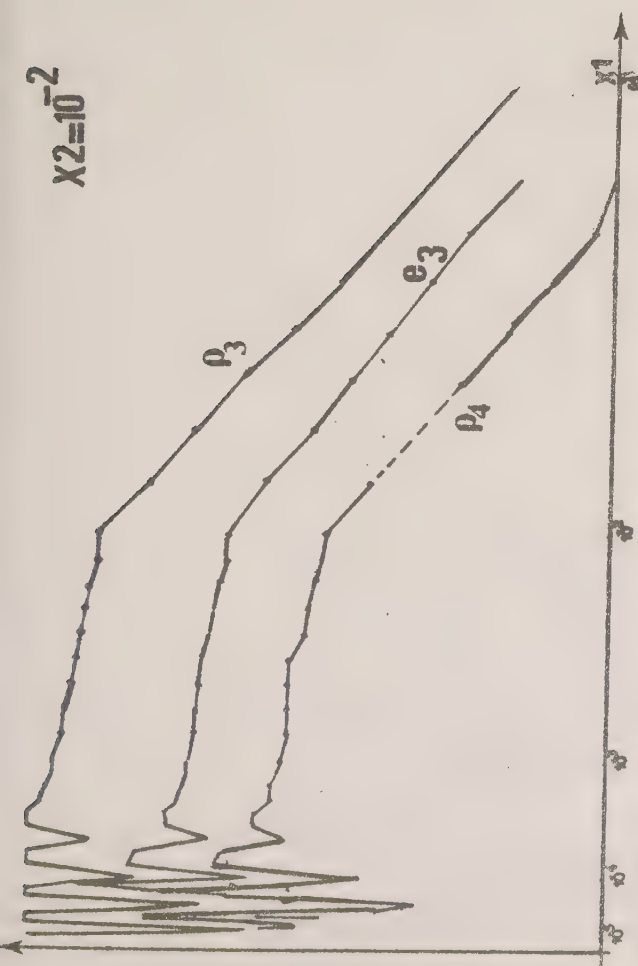


Fig II-11-b

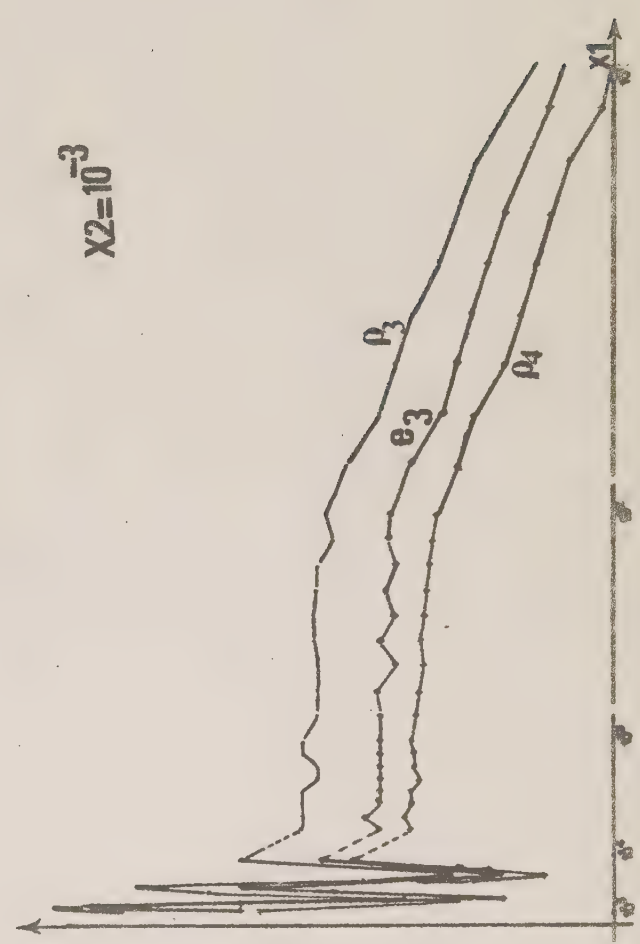


Fig II-11-c

g II-11 COURBES DE STABILITE
DES PARAMETRES EN FONCTION
DES ACCROISSEMENTS FINIS

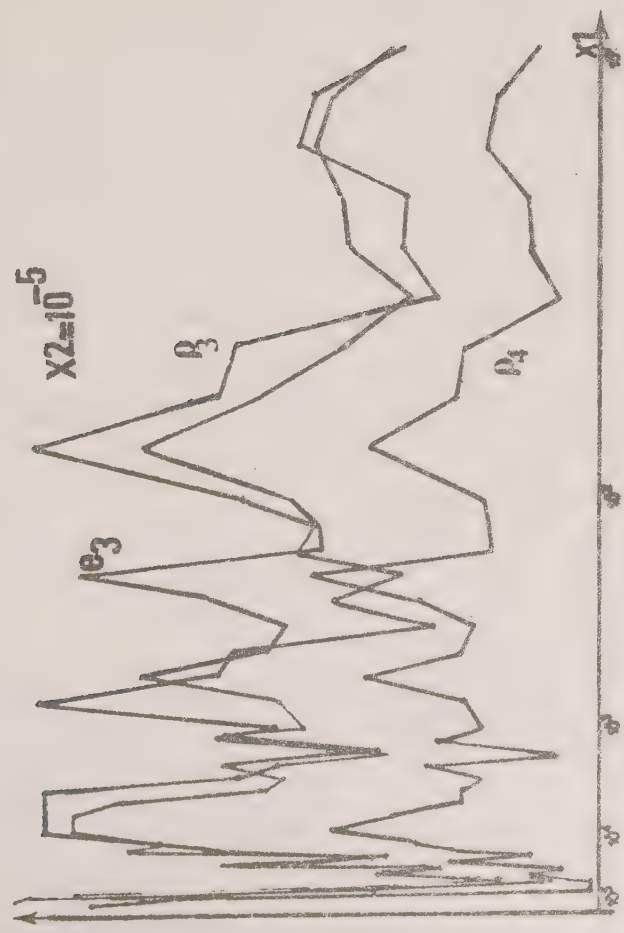


Fig II-11-e

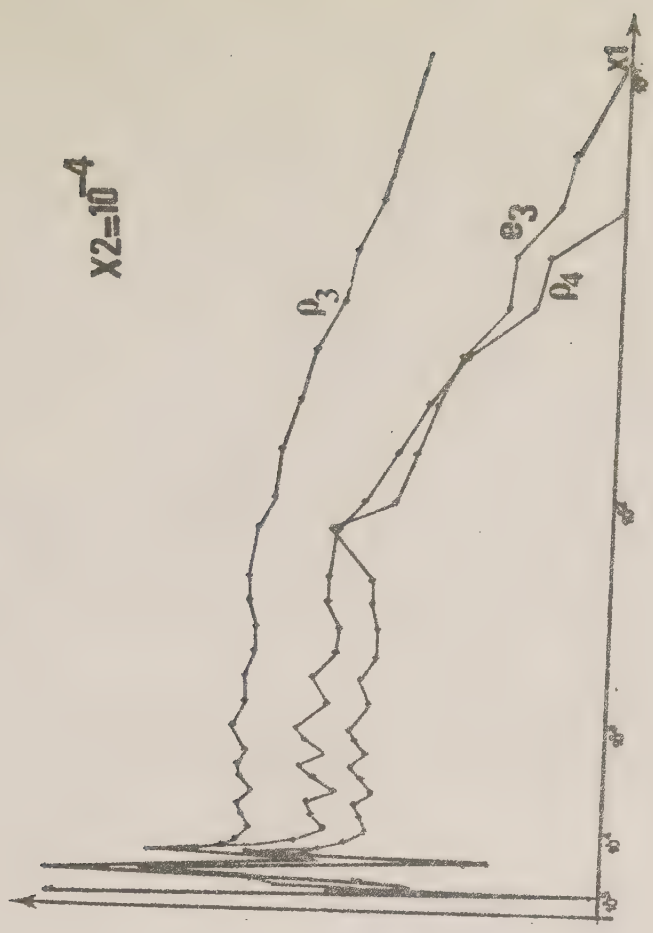


Fig II-11-d

FIG II-11 COURBES DE STABILITE DES PARAMETRES EN FONCTION
DES ACCROISSEMENTS FINIS

$$\delta x_1 = \rho_3^0 \cdot 4 \cdot 10^{-3}$$

$$\delta x_2 = \rho_3^0 \cdot 10^{-3}$$

$$\delta x_3 = 1 \cdot 10^{-3}$$

Dans le tableau V on présente les valeurs numériques des éléments de construction de la lentille (ρ_3, ρ_4, e_3), de la fonction de mérite Φ_1 , et le nombre d'itération k , obtenu à la fin du calcul pour les différentes valeurs de $\delta x_1, \delta x_2$.

Ainsi les valeurs numériques des accroissements finis ayant été choisies, le système final obtenu à partir de ces accroissements finis présente les caractéristiques suivantes :

- la fonction de mérite de l'oeil corrigé est égale à $\Phi_1 = 5,99763 \cdot 10^{-3}$,
- les éléments de construction de la lentille sont :
 - . $\rho_3 = 78,9244 \text{ (m}^{-1}\text{)}$ (courbure de la force avant)
 - . $\rho_4 = -64,7989 \text{ (m}^{-1}\text{)}$ (courbure de la force arrière)
 - . $e_3 = 5,8484 \text{ (mm)}$ (épaisseur de la lentille).

Enfin pour montrer l'efficacité de la méthode, on a présenté dans le tableau VI les caractéristiques optiques et géométriques de la lentille initiale (calculée à l'avant projet au moyen des formules d'optique paraxiale) et la lentille calculée par la méthode des moindres carrés.

TABLEAU VI

caractéristiques	lentille initiale	lentille finale
Rayon de courbure de la force avant	10,2 (mm)	12,7 (mm)
Rayon de courbure de la force arrière	-23,24 (mm)	-15,4 (mm)
L'épaisseur de la lentille	0,6 (mm)	5,8484 (mm)
Puissance de l'oeil équipé par la lentille	61,501	59,94
Puissance de la lentille	21,78	21,78
Fonction de mérite de l'oeil équipé par la lentille.	$\Phi_0 = 2,4433$	$\Phi_1 = 5,99 \cdot 10^{-3}$

TABLEAU V

[illegible]

TABLEAU V

X2	X1	ρ_3	ρ_4	e_3	Φ_1	K
1.m-03	1.m-03	79.7555	-64.9689	5.8051E-03	5.9976E-03	94
1.m-03	2.m-03	79.6977	-64.9717	5.8208E-03	5.9976E-03	97
1.m-03	3.m-03	79.7865	-64.9862	5.8297E-03	5.9976E-03	99
1.m-03	4.m-03	79.6689	-64.9825	5.8281E-03	5.9976E-03	98
1.m-03	5.m-03	79.6762	-64.9891	5.827E-03	5.9976E-03	97
1.m-03	6.m-03	79.8529	-64.9573	5.8251E-03	5.9976E-03	99
1.m-03	7.m-03	79.6465	-64.9834	5.8246E-03	5.9976E-03	101
1.m-03	8.m-03	79.8223	-64.9828	5.8228E-03	5.9976E-03	98
1.m-03	9.m-03	79.6841	-64.1853	5.8289E-03	5.9976E-03	99
1.m-03	1.m-04	79.4522	-64.2463	5.8897E-03	5.996E-03	63
1.m-03	2.m-04	79.9782	-64.7856	5.8492E-03	5.9976E-03	82
1.m-03	3.m-04	79.9185	-64.9839	5.8474E-03	5.9976E-03	88
1.m-03	4.m-04	79.8723	-64.9767	5.8231E-03	5.9976E-03	86
1.m-03	5.m-04	79.8842	-64.913	5.8377E-03	5.9976E-03	85
1.m-03	6.m-04	79.8887	-64.9886	5.8381E-03	5.9976E-03	87
1.m-03	7.m-04	79.7647	-64.9588	5.8345E-03	5.9976E-03	91
1.m-03	8.m-04	79.7563	-64.9588	5.8336E-03	5.9976E-03	92
1.m-03	9.m-04	79.7353	-64.9788	5.8319E-03	5.9976E-03	91
1.m-03	1.m-05	88.5881	-63.2125	5.9226E-03	6.2489E-03	24
1.m-03	2.m-05	79.1886	-63.2125	5.763E-03	6.014E-03	41
1.m-03	3.m-05	79.6143	-64.9856	5.8416E-03	5.9981E-03	48
1.m-03	4.m-05	99.1533	-63.6294	5.9467E-03	6.8892E-03	58
1.m-03	5.m-05	79.4584	-63.2466	5.8858E-03	5.998E-03	64
1.m-03	6.m-05	79.2481	-63.4448	5.7911E-03	5.9978E-03	63
1.m-03	7.m-05	79.9816	-64.8211	5.8458E-03	5.9977E-03	61
1.m-03	8.m-05	79.1394	-64.5937	5.8608E-03	5.9976E-03	59
1.m-03	9.m-05	79.6585	-63.86	5.826E-03	5.9976E-03	62
1.m-03	0.1	77.5751	-66.8831	5.73462E-03	5.9961E-03	94
1.m-03	0.2	76.214	-67.3786	5.62418E-03	5.9961E-03	89
1.m-03	0.3	74.9254	-68.687	5.52331E-03	6.88861E-03	86
1.m-03	0.4	73.6733	-69.7969	5.42931E-03	6.88261E-03	89
1.m-03	0.5	72.4681	-70.925	5.3427E-03	6.8852E-03	85
1.m-03	0.6	71.3325	-72.0247	5.2611E-03	6.8881E-03	84
1.m-03	0.7	70.1974	-73.1852	5.1836E-03	6.8114E-03	88
1.m-03	0.8	69.0944	-74.1544	5.1894E-03	6.8153E-03	78
1.m-03	0.9	67.9936	-75.2827	5.8388E-03	6.8194E-03	94
1.m-03	1.m-02	79.6372	-64.8627	5.8425E-03	5.9976E-03	96
1.m-03	2.m-02	79.712	-63.9811	5.8383E-03	5.9976E-03	102
1.m-03	3.m-02	79.5685	-63.1376	5.818E-03	5.9976E-03	101
1.m-03	4.m-02	79.4289	-63.2723	5.806E-03	5.9976E-03	109
1.m-03	5.m-02	79.2983	-63.4825	5.7941E-03	5.9976E-03	98
1.m-03	6.m-02	79.1451	-63.5482	5.782E-03	5.9973E-03	93
1.m-03	7.m-02	79.8889	-63.6779	5.7679E-03	5.9976E-03	92
1.m-03	8.m-02	79.8594	-63.8125	5.7562E-03	5.9976E-03	96
1.m-03	9.m-02	77.7165	-63.9467	5.7465E-03	5.9979E-03	97
1.m-03	1.m-01	79.889	-64.7183	5.6556E-03	5.9976E-03	98
1.m-03	2.m-03	79.9917	-64.7349	5.8541E-03	5.9976E-03	97
1.m-03	3.m-03	79.9714	-64.7541	5.8523E-03	5.9976E-03	96
1.m-03	4.m-03	79.9244	-64.7989	5.8484E-03	5.9976E-03	103
1.m-03	5.m-03	79.9475	-64.7769	5.8564E-03	5.9976E-03	102
1.m-03	6.m-03	79.924	-64.7963	5.8463E-03	5.9976E-03	97
1.m-03	7.m-03	79.9156	-64.8872	5.8475E-03	5.9976E-03	97
1.m-03	8.m-03	79.8951	-64.8267	5.8458E-03	5.9976E-03	99
1.m-03	9.m-03	79.8774	-64.8436	5.8443E-03	5.9977E-03	99
1.m-03	3.m-04	79.8297	-64.6988	5.8576E-03	5.9976E-03	86
1.m-03	4.m-04	79.8615	-64.6685	5.8682E-03	5.9976E-03	93
1.m-03	5.m-04	79.8222	-64.7853	5.8568E-03	5.9976E-03	91
1.m-03	6.m-04	79.8278	-64.7885	5.8573E-03	5.9976E-03	97
1.m-03	7.m-04	79.9627	-64.7625	5.8517E-03	5.9976E-03	96
1.m-03	8.m-04	79.7989	-64.7281	5.8547E-03	5.9976E-03	97
1.m-03	9.m-04	79.8864	-64.7289	5.8554E-03	5.9976E-03	99

TABLEAU V

X2	X1	ρ_3	ρ_4	e_3	Φ_1	K
1.E-03	1.E-05	80.14610	-63.6256	5.9257E-03	6.146E-03	26
1.E-03	2.E-05	81.13800	-62.6160	5.916E-03	6.0875E-03	46
1.E-03	3.E-05	79.3252	-63.3624	5.7912E-03	6.0805E-03	47
1.E-03	4.E-05	79.5534	-64.2947	5.9873E-03	5.9989E-03	56
1.E-03	5.E-05	88.1859	-63.6661	5.9476E-03	5.9987E-03	58
1.E-03	6.E-05	78.6829	-65.1837	5.8221E-03	5.998E-03	59
1.E-03	7.E-05	78.8269	-65.6539	5.7726E-03	5.9976E-03	56
1.E-03	8.E-05	78.4826	-65.2189	5.8093E-03	5.9979E-03	59
1.E-03	9.E-05	79.4119	-64.3338	5.8902E-03	5.9976E-03	64
1.E-04	0.1	77.6684	-66.0019	5.7412E-03	5.998E-03	63
1.E-04	0.2	76.3165	-67.2807	5.6311E-03	5.9991E-03	76
1.E-04	0.3	74.969	-68.5631	5.5258E-03	6.0007E-03	76
1.E-04	0.4	73.7345	-69.738	5.4327E-03	6.0028E-03	76
1.E-04	0.5	72.584	-70.8331	5.3483E-03	6.0054E-03	74
1.E-04	0.6	71.3727	-71.9847	5.2613E-03	6.0091E-03	69
1.E-04	0.7	70.2426	-73.0614	5.1847E-03	6.012E-03	72
1.E-04	0.8	69.1507	-74.1002	5.1117E-03	6.0158E-03	71
1.E-04	0.9	68.1123	-75.0879	5.0434E-03	6.0204E-03	68
1.E-04	1.E-02	78.6972	-64.8246	5.846E-03	5.9976E-03	92
1.E-04	2.E-02	78.7855	-64.9311	5.8364E-03	5.9976E-03	94
1.E-04	3.E-02	78.6673	-65.0434	5.826E-03	5.9976E-03	97
1.E-04	4.E-02	78.5429	-65.162	5.8156E-03	5.9976E-03	96
1.E-04	5.E-02	78.3829	-65.3903	5.7951E-03	5.9976E-03	87
1.E-04	6.E-02	78.2567	-65.4324	5.7915E-03	5.9977E-03	87
1.E-04	7.E-02	78.0177	-65.6617	5.7799E-03	5.9976E-03	84
1.E-04	8.E-02	77.9338	-65.7356	5.7638E-03	5.9979E-03	81
1.E-04	1.E-03	79.1066	-64.6227	5.6644E-03	5.9976E-03	95
1.E-04	2.E-03	78.9898	-64.7367	5.654E-03	5.9976E-03	93
1.E-04	3.E-03	79.0449	-64.6844	5.6588E-03	5.9976E-03	93
1.E-04	4.E-03	78.9636	-64.7613	5.6516E-03	5.9976E-03	93
1.E-04	5.E-03	78.9538	-64.7389	5.6509E-03	5.9976E-03	98
1.E-04	6.E-03	78.9929	-64.7336	5.6542E-03	5.9976E-03	95
1.E-04	7.E-03	78.9966	-64.7302	5.6546E-03	5.9976E-03	92
1.E-04	1.E-04	79.1847	-64.6264	5.6626E-03	5.9976E-03	96
1.E-04	2.E-04	78.9366	-64.7427	5.6568E-03	5.9976E-03	89
1.E-04	3.E-04	79.0311	-64.6971	5.6574E-03	5.9976E-03	82
1.E-04	4.E-04	79.0516	-64.6779	5.6593E-03	5.9976E-03	87
1.E-04	5.E-04	78.9685	-64.7646	5.6515E-03	5.9976E-03	88
1.E-04	6.E-04	79.0374	-64.6914	5.6582E-03	5.9976E-03	90
1.E-04	7.E-04	79.0864	-64.6448	5.6626E-03	5.9976E-03	95
1.E-04	8.E-04	79.9974	-64.7294	5.6546E-03	5.9976E-03	89
1.E-04	9.E-04	79.0602	-64.6621	5.6668E-03	5.9976E-03	90
1.E-04	1.E-05	82.5196	-61.2632	6.0281E-03	7.5027E-03	27
1.E-04	2.E-05	76.6193	-66.952	5.6675E-03	6.1953E-03	32
1.E-04	3.E-05	78.7316	-64.9982	5.8379E-03	6.0012E-03	44
1.E-03	4.E-05	79.0396	-64.6899	5.8382E-03	5.9976E-03	52
1.E-04	5.E-05	80.2365	-63.5387	5.9558E-03	6.0012E-03	53
1.E-04	6.E-05	79.3168	-64.4249	5.8816E-03	5.9976E-03	63
1.E-04	7.E-05	78.3837	-65.3125	5.8012E-03	5.9978E-03	56
1.E-04	8.E-05	79.6125	-64.1409	5.9045E-03	5.9987E-03	57
1.E-04	9.E-05	79.2594	-64.4801	5.8765E-03	5.9977E-03	68
1.E-05	0.1	77.6684	-66.0019	5.7412E-03	5.948E-03	63
1.E-05	0.3	74.969	-68.5631	5.5258E-03	6.0007E-03	76
1.E-05	0.4	73.7345	-69.738	5.4327E-03	6.0028E-03	76
1.E-05	0.5	72.584	-70.8331	5.3483E-03	6.0054E-03	74
1.E-05	0.6	71.3727	-71.9847	5.2613E-03	6.0091E-03	69
1.E-05	0.7	70.2426	-73.0614	5.1847E-03	6.012E-03	72
1.E-05	0.8	69.1507	-74.1002	5.1117E-03	6.0158E-03	71
1.E-05	0.9	68.1123	-75.0879	5.0434E-03	6.0204E-03	68

TABLEAU V

X2	X1	ρ_3	ρ_4	e_3	Φ_1	K
1.E-05	1.E-02	78.8972	-64.8248	5.846E-03	5.9976E-03	92
1.E-05	2.E-02	78.7655	-64.9311	5.8384E-03	5.9976E-03	94
1.E-05	3.E-02	78.6673	-65.0404	5.828E-03	5.9976E-03	87
1.E-05	4.E-02	78.5429	-65.162	5.8156E-03	5.9976E-03	96
1.E-05	5.E-02	78.3929	-65.2965	5.7951E-03	5.9977E-03	87
1.E-05	6.E-02	78.2587	-65.4324	5.7615E-03	5.9977E-03	87
1.E-05	7.E-02	78.0177	-65.6617	5.7109E-03	5.9973E-03	84
1.E-05	8.E-02	78.9358	-65.7396	5.7638E-03	5.9979E-03	61
1.E-05	1.E-03	79.1696	-64.6227	5.8644E-03	5.9978E-03	95
1.E-05	2.E-03	78.9898	-64.7567	5.854E-03	5.9978E-03	93
1.E-05	3.E-03	79.6449	-64.8248	5.8566E-03	5.9976E-03	93
1.E-05	5.E-03	78.9553	-64.7789	5.8569E-03	5.9976E-03	95
1.E-05	6.E-03	78.9919	-64.7336	5.8542E-03	5.9976E-03	92
1.E-05	7.E-03	78.9966	-64.7382	5.8546E-03	5.9976E-03	86
1.E-05	1.E-04	79.1647	-64.6264	5.8626E-03	5.9978E-03	69
1.E-05	2.E-04	78.9876	-64.7427	5.8536E-03	5.9976E-03	82
1.E-05	3.E-04	79.0311	-64.6971	5.8574E-03	5.9976E-03	82
1.E-05	4.E-04	79.0516	-64.6779	5.8593E-03	5.9976E-03	87
1.E-05	5.E-04	78.9685	-64.7646	5.8515E-03	5.9976E-03	88
1.E-05	6.E-04	79.0574	-64.6914	5.8582E-03	5.9976E-03	96
1.E-05	7.E-04	79.0664	-64.6448	5.8626E-03	5.9976E-03	95
1.E-05	8.E-04	78.9974	-64.7294	5.8546E-03	5.9976E-03	69
1.E-05	9.E-04	79.0682	-64.6621	5.8606E-03	5.9976E-03	96
1.E-05	1.E-05	82.5196	-61.2632	6.0281E-03	7.5827E-03	27
1.E-05	2.E-05	76.6193	-66.552	5.6875E-03	6.1953E-03	32
1.E-05	3.E-05	78.7316	-64.9982	5.8379E-03	6.0012E-03	44
1.E-05	4.E-05	79.0396	-64.8399	5.8582E-03	5.9976E-03	52
1.E-05	5.E-05	80.2368	-63.5387	5.9558E-03	6.0012E-03	53
1.E-05	6.E-05	79.3168	-64.4249	5.8816E-03	5.9976E-03	63
1.E-05	7.E-05	78.3637	-65.3125	5.8812E-03	5.9976E-03	56
1.E-05	8.E-05	79.6125	-64.1469	5.9849E-03	5.9987E-03	57
1.E-05	9.E-05	79.2594	-64.4661	5.8765E-03	5.9977E-03	66

D.5. Tolérance de réalisation pratique de la lentille

Pour définir la tolérance sur les paramètres de construction de la lentille, on a adopté la règle suivante :

- soit Φ_1 la valeur numérique de la fonction de mérite de l'oeil corrigé et Φ_s celle de la fonction de mérite de l'oeil schématique ;

- soit Φ_i la valeur de la fonction de mérite de l'oeil corrigé, avec un accroissement Δ portant sur l'un (ou tous) des paramètres de la lentille. Un accroissement sur un paramètre est admissible si :

$$\frac{(\Phi_i - \Phi_1)}{\Phi_1} \leq \frac{(\Phi_s - \Phi_1)}{\Phi_1} .$$

Or, on a montré que :

$$\begin{aligned} \Phi_1 &= 5,99763.10^{-3} \\ & \text{et} \\ \Phi_s &= 6,72945.10^{-3} \end{aligned}$$

on obtient ainsi la condition limite des erreurs sur les paramètres de construction de la lentille :

$$\frac{(\Phi_i - \Phi_1)}{\Phi_1} \leq 0,1220 \quad (24)$$

Pour estimer les valeurs limites de la tolérance sur les paramètres à l'aide de la relation (24) on a tracé les courbes $(\Phi_i - \Phi_1)/\Phi_1$ en fonction des accroissements Δ donnés aux paramètres, Fig. (II.12,a,b,c,d). Les figures (II.12,a,b,c) représentent $(\Phi_i - \Phi_1)/\Phi_1$ en fonction, respectivement, de $\Delta\rho_3$, $\Delta\rho_4$, Δe_3 avec un pas d'accroissement défini par :

$$\begin{aligned} - \Delta\rho_3 &= 1 \text{ m}^{-1} \\ - \Delta\rho_4 &= 1 \text{ m}^{-1} \\ - \Delta e_3 &= 0,15 \text{ mm.} \end{aligned}$$

Fig II-12 -b

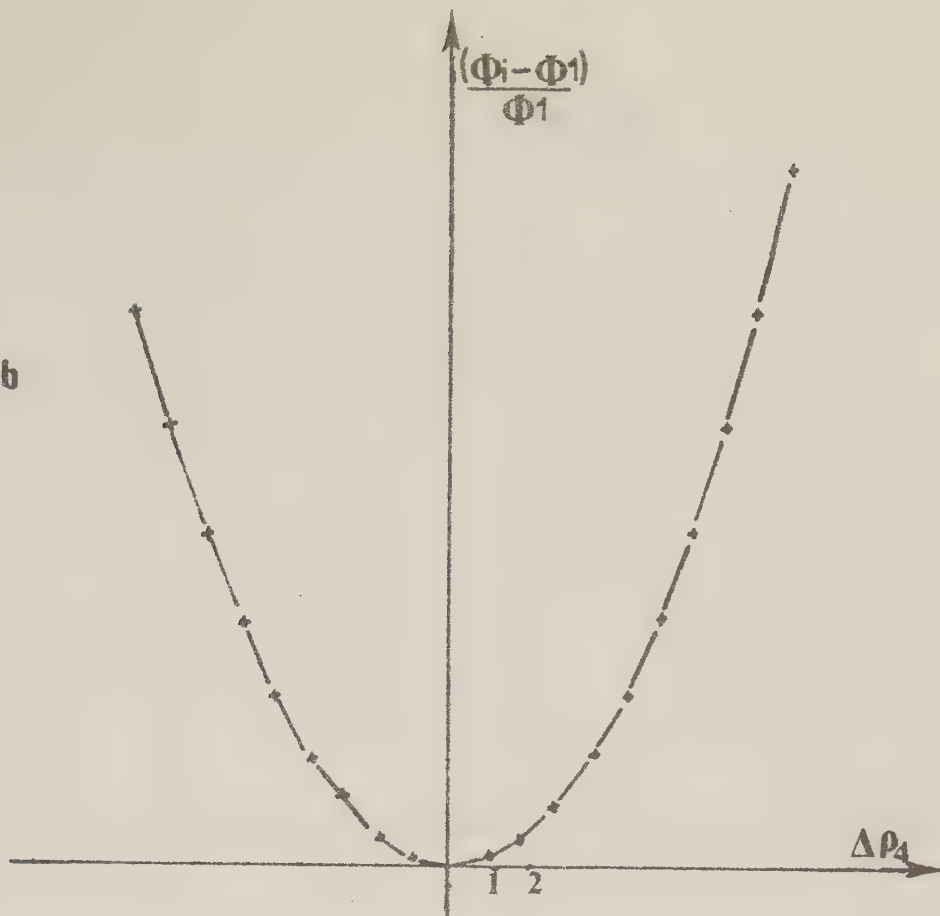


Fig II-12-a

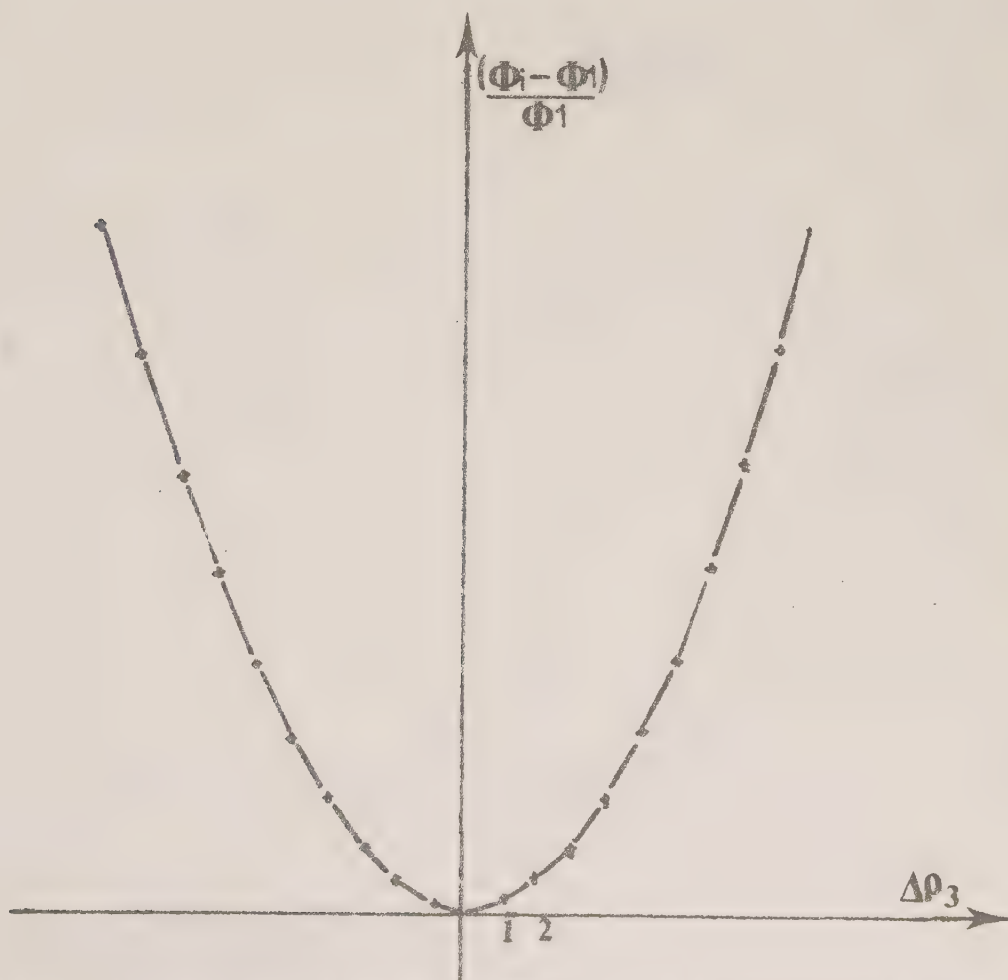


Fig II-12 COURBES D'ETABLISSEMENT DES TOLERANCES SUR LES PARAMETRES DE CONSTRUCTION DE LA LENTILLE POUR UNE EPAISSEUR DE 5,8484mm

Fig II-12.c

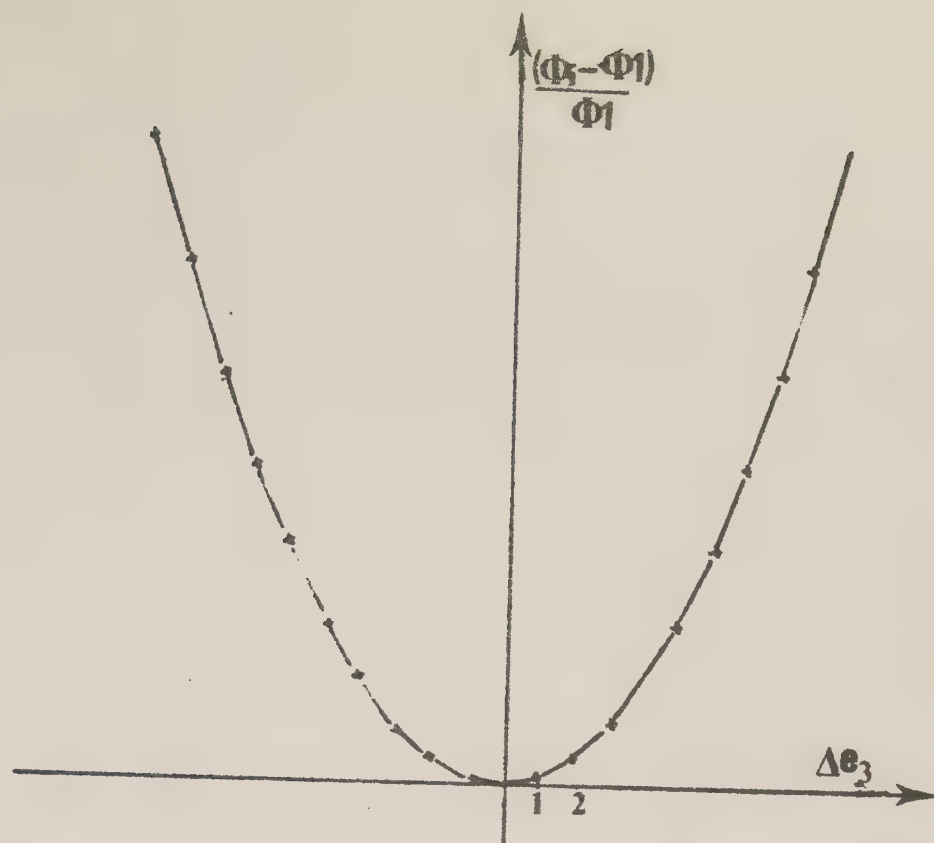


Fig II-12.d

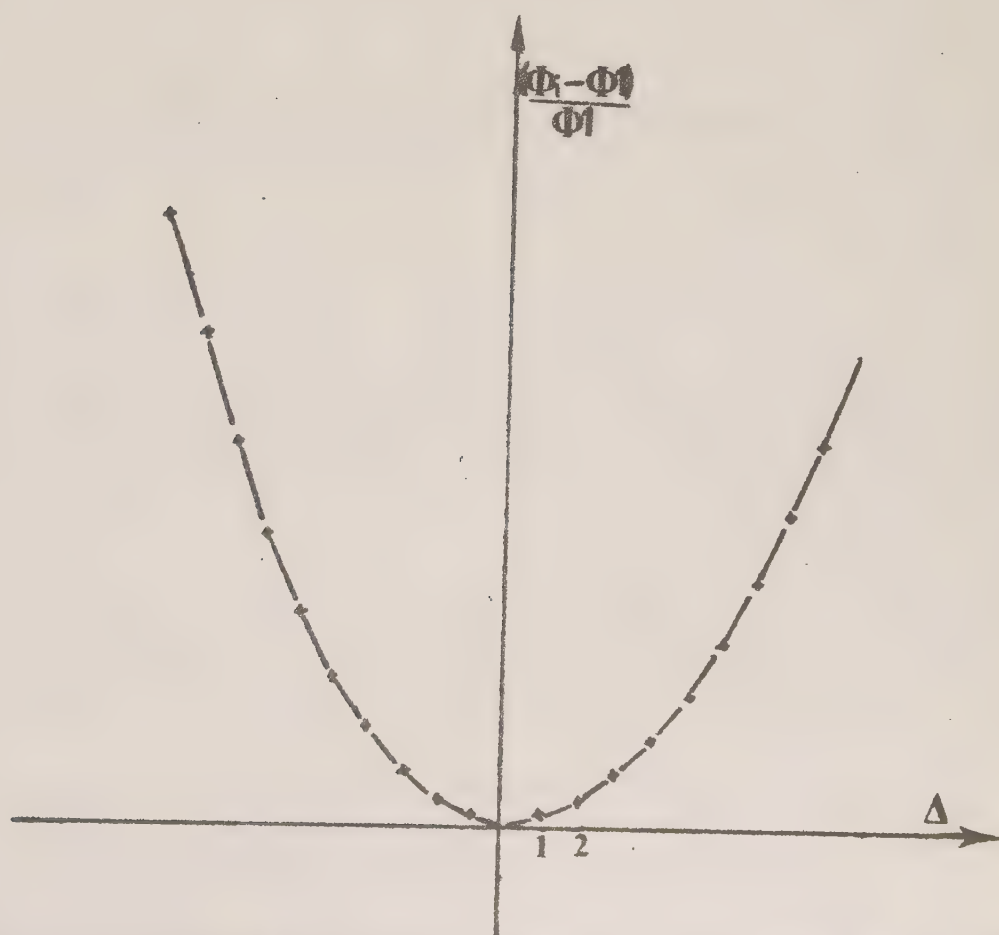


Fig II-12 COURBES D'ETABLISSEMENT DES TOLERANCES SUR LES PARAMETRES DE CONSTRUCTION DE LA LENTILLE POUR UNE EPAISSEUR DE 5,8484mm

La figure (II.12.d) représente $(\Phi_i - \Phi_1)/\Phi_1$ en fonction des variations données à l'ensemble des paramètres.

Dans le tableau VII a,b,c,d, on a donné les valeurs numériques obtenues pour Φ_i , $(\Phi_i - \Phi_1)/\Phi_1$ et les valeurs numériques de paramètres ; l'ensemble des courbes (fig. II.12 a,b,c,d) et des tableaux VII a,b,c,d montre que : la tolérance sur les paramètres est assez étroite, de l'ordre de :

$$- \Delta \rho_3 \approx \pm 0,3 \text{ m}^{-1}$$

$$- \Delta \rho_4 \approx \pm 0,3 \text{ m}^{-1}$$

$$- \Delta e_3 \approx \pm 0,12 \text{ mm}$$

Ainsi, si l'on tient compte de la faible tolérance de réalisation, toute erreur commise perturbe le fonctionnement correct de la lentille.

D.6. Représentation de la tache image sur la rétine.

Forme de la surface image.

D.6.a. Tache image

Les figures (II.13 a,b,c,d) illustrent la forme de la tache image, pour différentes inclinaisons des rayons par rapport à l'axe optique. Ces rayons sont convenablement répartis sur la pupille d'entrée de l'oeil, dont le diamètre d'ouverture est 8 mm.

On constate que les dimensions de la tache image de l'oeil corrigé sont réduites par rapport aux dimensions de la tache image de l'oeil schématique (fig. II.14), cette réduction est le signe le plus net de la correction de l'oeil par la lentille.

D.6.b. Forme de la surface image

Pour connaître la forme et la position de la surface image par rapport à la surface réceptrice (rétine), on a adopté comme surface image celle qui contient la tache de moindre diffusion.

TABLEAU VII-a

ϕi	$(\phi i - \phi 1) / \phi 1$	$\rho 3$
3.91675	652.05	68.9244
3.17371	528.161	69.9244
2.50888	417.311	70.9244
1.92225	319.502	71.9244
1.41385	234.735	72.9244
0.98367	163.01	73.9244
0.631706	104.326	74.9244
0.357952	58.6823	75.9244
0.162421	26.0808	76.9244
4.51003E-02	6.51969	77.9244
5.99763E-03	1.55282E-07	78.9244
4.51106E-02	6.5214	79.9244
0.162443	26.0846	80.9244
0.357988	58.6882	81.9244
0.63175	104.333	82.9244
0.983731	163.02	83.9244
1.41393	234.747	84.9244
1.92234	319.517	85.9244
2.50895	417.324	86.9244
3.17381	528.177	87.9244
3.91688	652.071	88.9244

TABLEAU VII-b

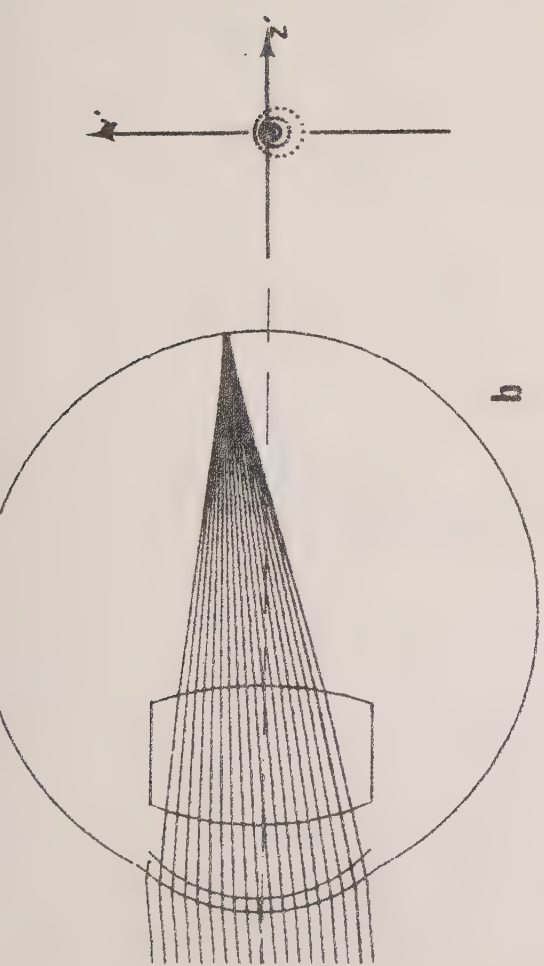
ϕi	$(\phi i - \phi 1) / \phi 1$	$\rho 4$
3.36983	550.857	-74.7989
2.6821	446.194	-73.7989
2.12044	352.547	-72.7989
1.62488	269.92	-71.7989
1.19538	198.306	-70.7989
0.831966	137.716	-69.7989
0.534623	88.139	-68.7989
0.303348	49.578	-67.7989
0.138154	22.0348	-66.7989
3.90398E-02	5.5092	-65.7989
5.99763E-03	1.55282E-07	-64.7989
3.90312E-02	5.50777	-63.7989
0.13814	22.0325	-62.7989
0.303325	49.5742	-61.7989
0.534586	88.1329	-60.7989
0.831918	137.708	-59.7989
1.19533	198.321	-58.7989
1.62482	269.91	-57.7989
2.12038	352.536	-56.7989
2.68201	446.179	-55.7989
3.36973	550.84	-54.7989

TABLEAU VII-c

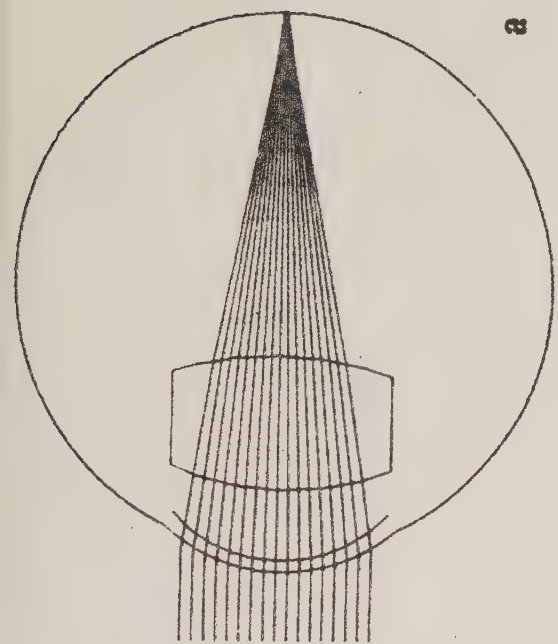
ϕ_1	$(\phi_1 - \phi_1)/\phi_1$	e_3
0.311642	50.9608	4.34844E-03
0.253568	41.2781	4.49844E-03
0.261615	32.6158	4.64844E-03
0.155787	24.9715	4.79844E-03
0.116038	18.3472	4.94844E-03
0.24152E-02	12.7413	5.09844E-03
5.49657E-02	6.15456	5.24844E-03
0.35117E-02	4.5975	5.39844E-03
1.82274E-02	2.03969	5.54844E-03
9.05686E-03	0.510074	5.69844E-03
5.99763E-03	7.76409E-08	5.84844E-03
9.05133E-03	0.509152	5.99844E-03
1.82163E-02	2.03724	6.14844E-03
0.3495E-02	4.58471	6.29844E-03
5.48832E-02	6.15082	6.44844E-03
0.2387E-02	12.7366	6.59844E-03
0.116003	18.3415	6.74844E-03
0.155727	24.9647	6.89844E-03
0.201568	32.608	7.04844E-03
0.253515	41.2692	7.19844E-03
0.311581	50.9508	7.34844E-03

TABLEAU VII-d

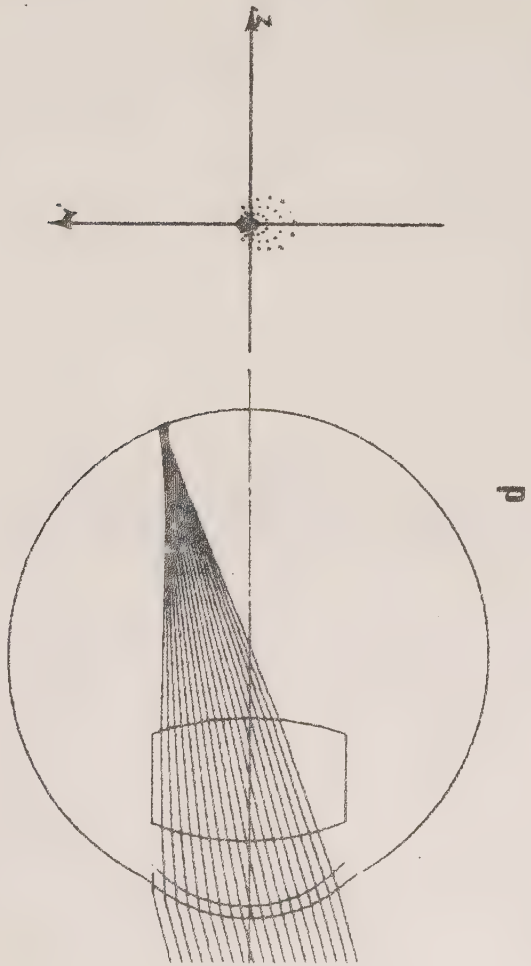
ϕ_1	$(\phi_1 - \phi_1)/\phi_1$	p_3	p_4	e_3
0.151225	24.2142	68.9244	-74.7989	4.34844E-03
0.119248	18.8825	69.9244	-73.7989	4.49844E-03
9.20567E-02	14.3489	70.9244	-72.7989	4.64844E-03
6.93037E-02	10.5552	71.9244	-71.7989	4.79844E-03
5.06379E-02	7.44299	72.9244	-70.7989	4.94844E-03
3.57146E-02	4.95479	73.9244	-69.7989	5.09844E-03
2.42091E-02	3.03644	74.9244	-68.7989	5.24844E-03
1.57951E-02	1.63356	75.9244	-67.7989	5.39844E-03
1.01571E-02	0.693513	76.9244	-66.7989	5.54844E-03
6.98986E-03	0.165437	77.9244	-65.7989	5.69844E-03
5.99763E-03	1.55282E-07	78.9244	-64.7989	5.84844E-03
6.89356E-03	0.149381	79.9244	-63.7989	5.99844E-03
9.40259E-03	0.567717	80.9244	-62.7989	6.14844E-03
1.326E-02	1.21088	81.9244	-61.7989	6.29844E-03
1.82122E-02	2.03657	82.9244	-60.7989	6.44844E-03
2.40192E-02	3.00478	83.9244	-59.7989	6.59844E-03
3.0454E-02	4.07767	84.9244	-58.7989	6.74844E-03
3.72967E-02	5.21857	85.9244	-57.7989	6.89844E-03
4.4348E-02	6.39425	86.9244	-56.7989	7.04844E-03
5.1423E-02	7.57389	87.9244	-55.7989	7.19844E-03
5.8341E-02	8.72734	88.9244	-54.7989	7.34844E-03



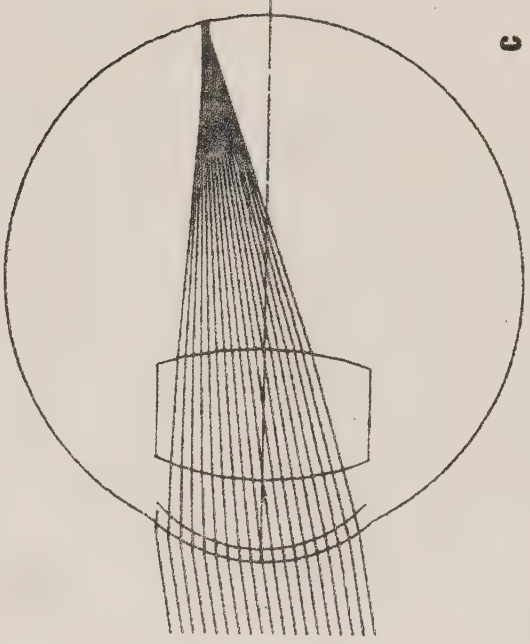
b



a



d



c

FIG II-13 MARCHE DES RAYONS ET FORME DE LA TACHE IMAGE SUR LA
RETINE POUR DIFFERENTES INCLINAISONS θ DES RAYONS SUR
L'AXE OPTIQUE
a- $\theta=0^\circ$
b- $\theta=5^\circ$
c- $\theta=10^\circ$
d- $\theta=15^\circ$

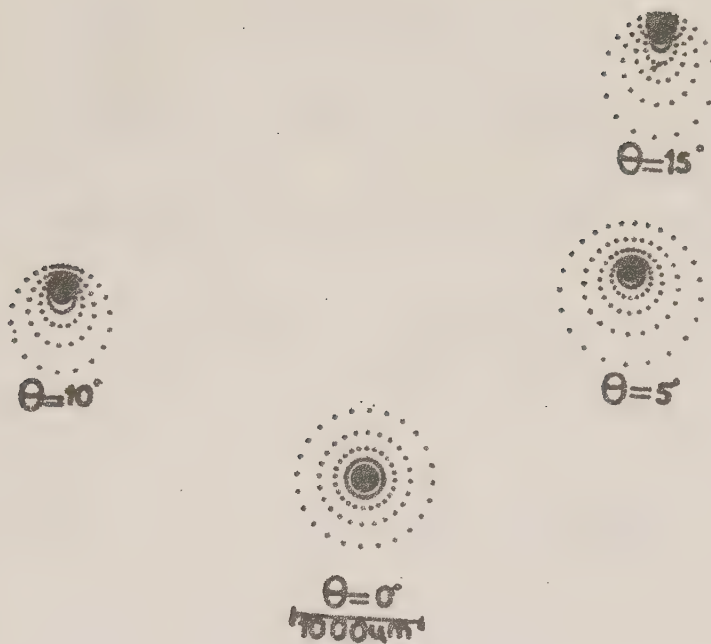


Fig II-14 FORME DE LA TACHE IMAGE POUR DIFFERENTES INCLINAISONS θ
(CAS DE L'OEIL SCHEMATIQUE)

- Recherche du rayon de courbure de cette surface. Elle est donnée par⁽²⁷⁾ :

$$\rho_m = \frac{1}{2} (\rho'_s + \rho'_t)$$

où ρ'_s : courbure de la surface image sagittale

ρ'_t : courbure de la surface image tangentielle.

Ces deux dernières s'expriment par les formules :

$$\rho'_s = 2 \left(\frac{x'_F}{h'_F} \right) \cdot \frac{S_4}{y'_O \cdot H_O}$$

$$\rho'_t = 2 \left(\frac{x'_F}{h'_F} \right) \cdot \frac{(2S_3 + S_4)}{y'_O \cdot H_O}$$

où x'_F : distance entre le dernier dioptre et le foyer image du système,

h'_F : hauteur d'incidence du rayon marginal sur le dernier dioptre,

y'_O : hauteur d'incidence du rayon pupillaire sur la rétine,

H_O : rayon d'ouverture de la pupille d'entrée de l'oeil,

S_3 : terme d'astigmatisme (cf. tableau IV),

S_4 : terme de courbure de champ (cf. tableau IV).

Calcul numérique de ces quantités :

- rayon de la surface image sagittale

$$R'_s = \frac{1}{\rho'_s} = 13,33 \text{ mm}$$

- rayon de la surface image tangentielle

$$R'_t = \frac{1}{\rho'_t} = 9,07 \text{ mm}$$

- rayon de la surface image

$$R'_m = \frac{1}{\rho'_m} = 10,8 \text{ mm.}$$

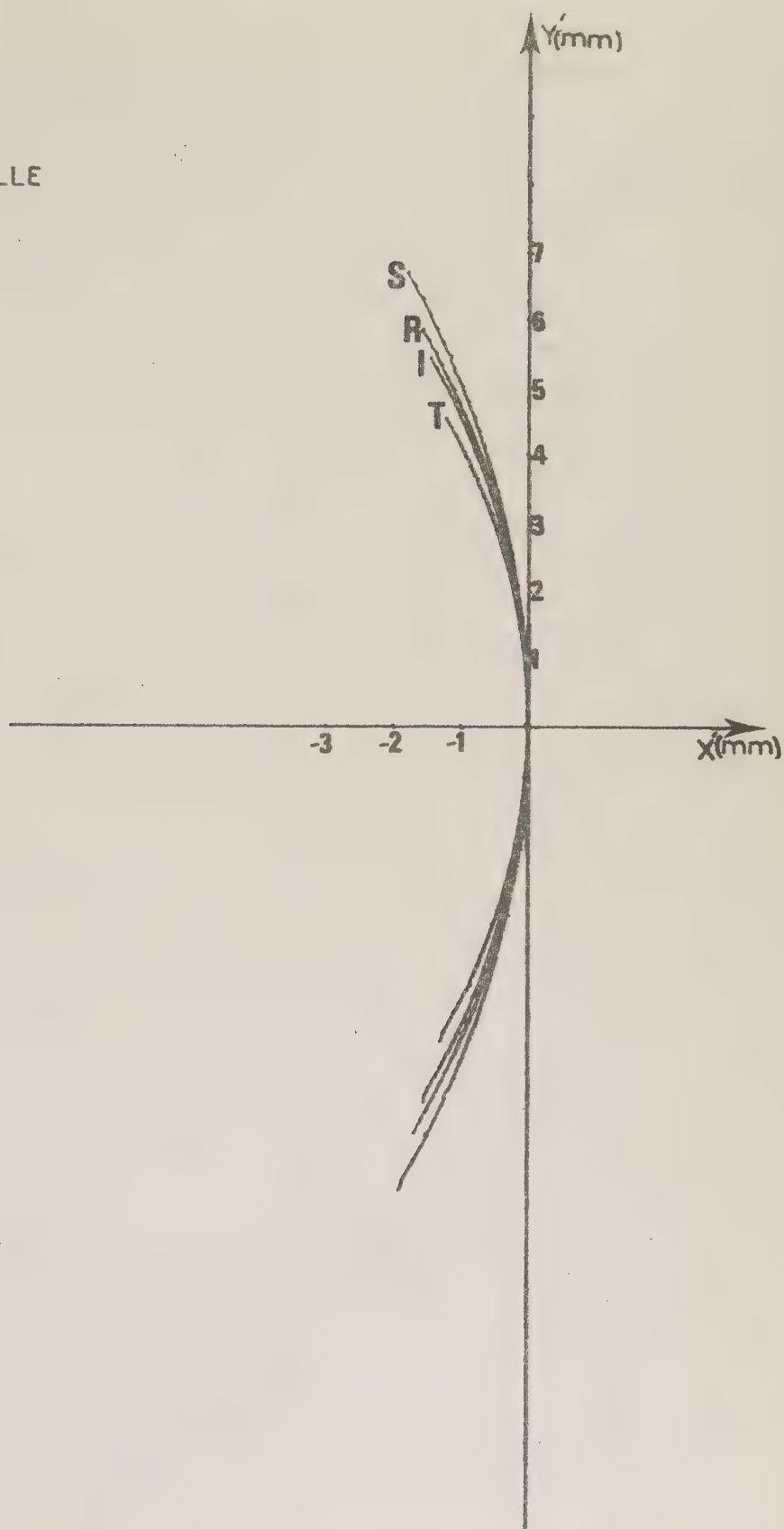
Sur la figure II.15, on a représenté les trois surfaces images et la surface de la rétine. Cette figure montre qu'un faisceau de lumière issu d'un point objet à l'infini donne, après traversée de l'œil, un pinceau, qui, dans le corps vitré, s'appuie sur une focale sagittale (surface image sagittale), située derrière la rétine, tandis que la focale tangentielle se trouve en avant de celle-ci. On a admis 11,7 mm comme rayon de la sphère qui est censée représenter la rétine. On constate également que la surface image ne coïncide pas avec la rétine dans la région périphérique, ce qui explique que, au fur et à mesure qu'augmente l'angle d'inclinaison des rayons obliques (issus d'un point à l'infini), la structure de l'image périphérique se modifie par rapport à celle de l'axe optique. Cependant le pouvoir séparateur de l'œil baisse en vision périphérique dans des proportions telles que ce défaut perd de son importance.

Remarques et conclusion

Le modèle du calcul qui vient d'être développé doit-être considéré comme une première approche du problème, même si le résultat obtenu jusqu'ici n'est pas compatible avec son aspect pratique ; en effet, l'implantation dans l'œil d'une lentille de 5,8484 mm d'épaisseur présente deux inconvénients considérables : un poids et une épaisseur tels que l'œil ne peut pas la supporter. Ces deux facteurs doivent donc être pris en considération lors du calcul du cristallin, c'est pourquoi on a calculé une lentille d'épaisseur fixe égale à 0,6 mm, les paramètres choisis comme variables étant les deux rayons de courbures de la lentille. Les résultats obtenus sont illustrés par les tableaux VIII et IX et les figures II.16 à 18. La figure (II.16c) montre bien que l'on peut minimiser la fonction de mérite du système en augmentant l'épaisseur de la lentille, ce qui est en accord avec le résultat précédent. D'après les schémas II.17 a,b,c,d, on constate que les dimensions de la tache image n'ont pas été réduites considérablement par rapport à celles de la tache que

Fig 1-15

- S: SURFACE IMAGE SAGITTALE
- R: SURFACE DE LA RETINE
- I: SURFACE IMAGE
- T: SURFACE IMAGE TANGENTIELLE



En résumé, le calcul montre que la correction de l'oeil aphaque par une lentille, donne des résultats intéressants, au prix d'une augmentation de l'épaisseur de cette lentille, la rendant, dans ce cas, inutilisable cliniquement. C'est pourquoi on a envisagé une autre solution qui consiste à corriger l'oeil aphaque à l'aide d'un doublet et non plus d'une lentille, ce qui fait l'objet du chapitre suivant.

TABLEAU VIII - CARACTERISTIQUES OPTIQUES ET GEOMETRIQUES DE LA LENTILLE

- rayon de courbure de la face avant	24,7976 mm
- rayon de courbure de la face arrière	-10,4460 mm
- indice de refraction	1,49166
- puissance de la lentille	21,0849 dpt
- puissance de l'oeil équipé par la lentille	60,7467 dpt
- anisiconie	1,32 %
- diamètre d'ouverture de la lentille	6,6 mm
- épaisseur de la lentille	0,6 mm

TABLEAU IX - RAYONS DE COURBURE DES SURFACES IMAGES

- rayon de la surface image sagittale	12,86 mm
- rayon de la surface image tangentielle	8,33 mm
- rayon de la surface image de moindre diffusion	10,11 mm

Fig II-16-a

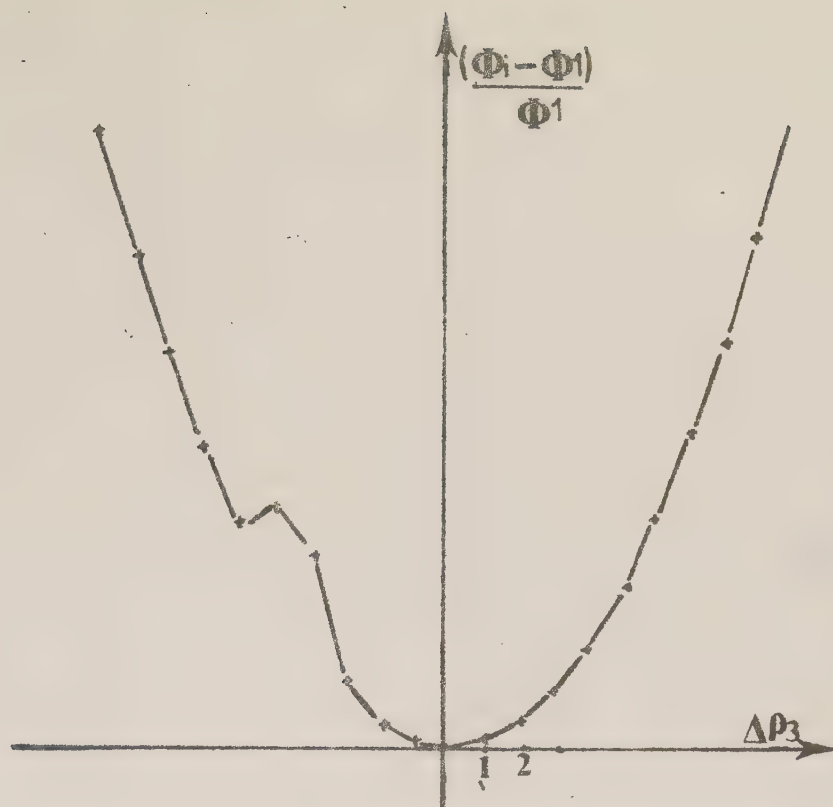


Fig II-16b

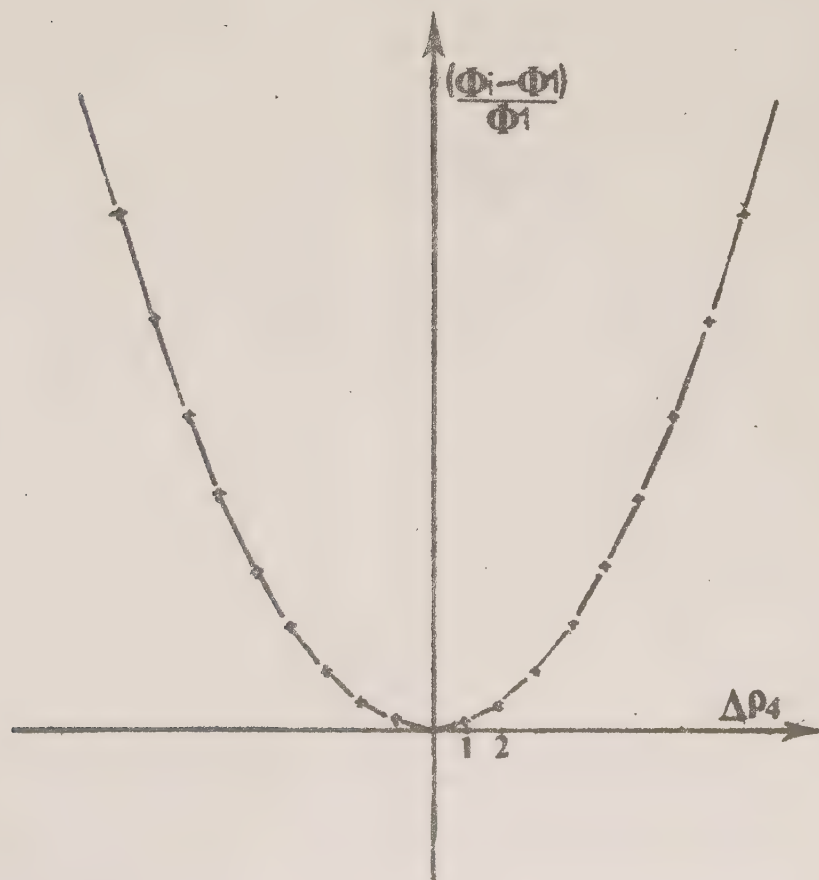


Fig II-16 COURBES D'ETABLISSEMENT DES TOLERANCES SUR LES PARAMETRES DE CONSTRUCTION DE LA LENTILLE POUR UNE EPAISSEUR DE 0,6mm

Fig II-16.c

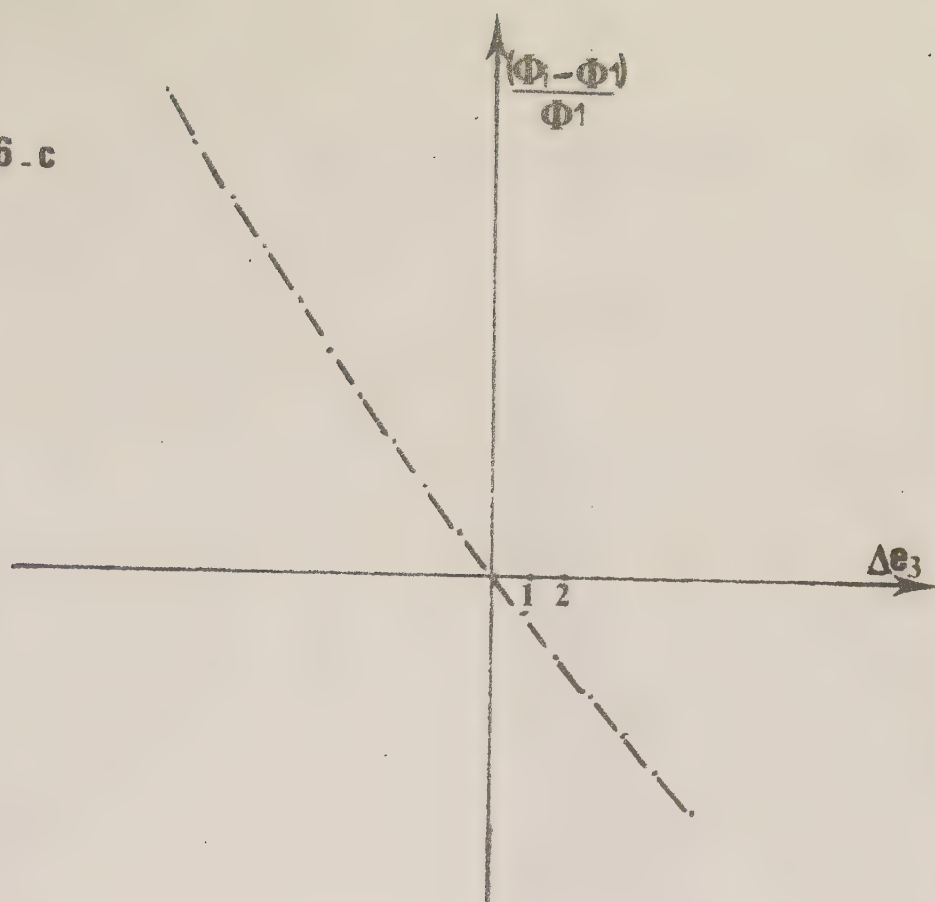


Fig II-16.d

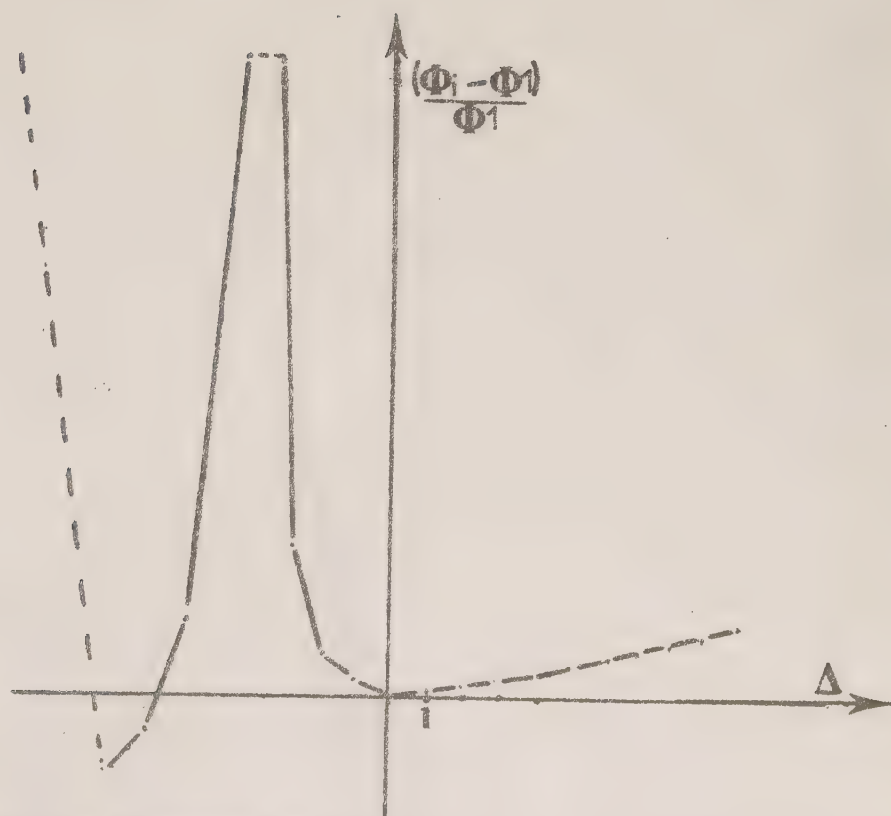
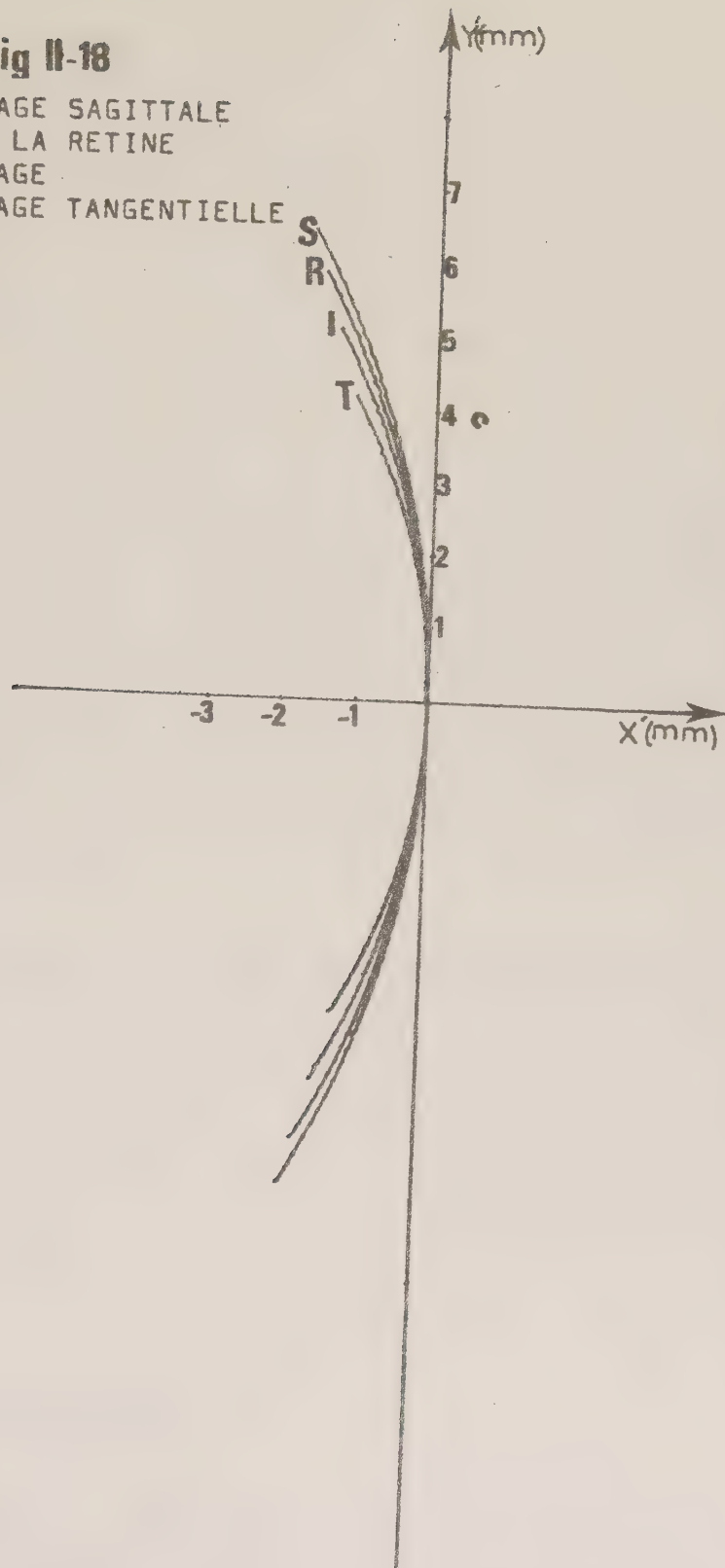


Fig II-16 COURBES D'ETABLISSEMENT DES TOLERANCES SUR LES PARAMETRES DE CONSTRUCTION DE LA LENTILLE POUR UNE EPAISSEUR DE 0,6mm

Fig II-18

- S: SURFACE IMAGE SAGITTALE
- R: SURFACE DE LA RETINE
- I: SURFACE IMAGE
- T: SURFACE IMAGE TANGENTIELLE



CHAPITRE III

CALCUL D'UN DOUBLET

INTRODUCTION

Dans le chapitre précédent, nous avons constaté qu'une correction de l'oeil aphaque par une lentille mince, donne sur la rétine une image entachée de diverses aberrations. On peut songer à faire coïncider l'image donnée par la lentille cornéenne avec la surface rétinienne à l'aide d'un doublet, tout en compensant la sous-correction due à la cornée par une sur-correction introduite par le doublet. Ainsi l'intérêt majeur du doublet est, tout en offrant les mêmes commodités d'implantation qu'une lentille simple, de permettre également une correction d'aberrations chromatiques tout en réduisant les aberrations géométriques de l'image définitive.

Dans ce chapitre, nous déterminerons les paramètres initiaux de construction du doublet emmetropisant l'oeil aphaque. Puis nous reprendrons le calcul des formules donnant les termes additionnels d'aberrations de l'oeil corrigé par le doublet. Enfin après avoir déterminé les paramètres de construction définitifs du doublet par la méthode des moindres carrés, nous interpréterons les résultats en présentant la forme de la surface image, l'allure de la tache image sur la rétine et les courbes d'aberrations de l'oeil corrigé, d'une part, et schématique d'autre part.

A - ETABLISSEMENT DE L'AVANT PROJET

Pour déterminer les paramètres de construction du doublet, on suppose que celui-ci est une association de deux lentilles collées, dont les caractéristiques optiques et géométriques sont données par le tableau X.

	1ère lentille	2ème lentille
Epaisseur	$e_3 = 0,5 \text{ mm}$	$e_4 = 0,5 \text{ mm}$
Indice de réfraction	1,49166	1,56735
Coefficient de réfraction	56,37	34,87
Courbure $\rho_i = 1/R_i$	$\rho_3 = 128,20 \text{ m}^{-1}$ $\rho_4 = \text{inconnu}$	$\rho_5 : \text{inconnu}$
Matière	Methyl Methacrylate	Acrylonitrile Styrène
Dispersion δn	0,00857	0,01627

TABLEAU X

Le problème qui se pose alors s'énonce comme suit : déterminer les deux courbures ρ_4, ρ_5 du doublet défini plus haut, tel que l'oeil aphaque équipé par un tel doublet réalise les deux conditions suivantes :

- donner d'un point objet à l'infini une image ponctuelle sur la rétine (condition de stigmatisme et d'échelle^{*})
- annuler l'aberration chromatique de position $\delta x'$ (condition d'achromatisme).

* Dans un traitement rigoureux la condition d'échelle correspond à l'isoplanetisme ou encore à l'invariance par translation.

Pour ce faire, on écrit les deux équations exprimant les deux conditions et on tire les valeurs de ρ_4 , ρ_5 .

1 - FORMULATION DE L'EQUATION EXPRIMANT LA CONDITION D'ECHELLE

Cette équation s'exprime à l'aide :

- des formules donnant la marche d'un rayon paraxial (marginal) à travers un système optique centré ¹⁵ ;
- de la condition nécessaire pour que ce rayon atteigne la rétine.

1.a. Formules donnant la marche d'un rayon paraxial

$$X'_i = X_i + F_i \quad (\text{Formules d'effectivités})$$

$$X_{i+1} = \frac{X'_i}{1 - \frac{e_i}{n_{i+1}} X'_i}$$

$$c_{i+1} = 1 - e_i \cdot \frac{X'_i}{n_{i+1}} \quad (\text{Rapport des hauteurs paraxiales})$$

$$h_i = c_i \times c_{i-1} \times \dots \times c_1 \cdot \frac{H_1}{H_0} \quad (h_i : \text{coefficient de hauteur paraxial})$$

$$q_i = (n_{i+1} \times \rho_i - X'_i) \quad (\text{Invariant objectif})$$

1.b. Le rayon coïncide avec la rétine (Fig. III.1) lorsque :

$$X'_5 = \frac{n_6}{1 - (v + e_3 + e_4)},$$

avec : l - longueur axiale de l'oeil

v - distance entre le sommet cornéen et le doublet.

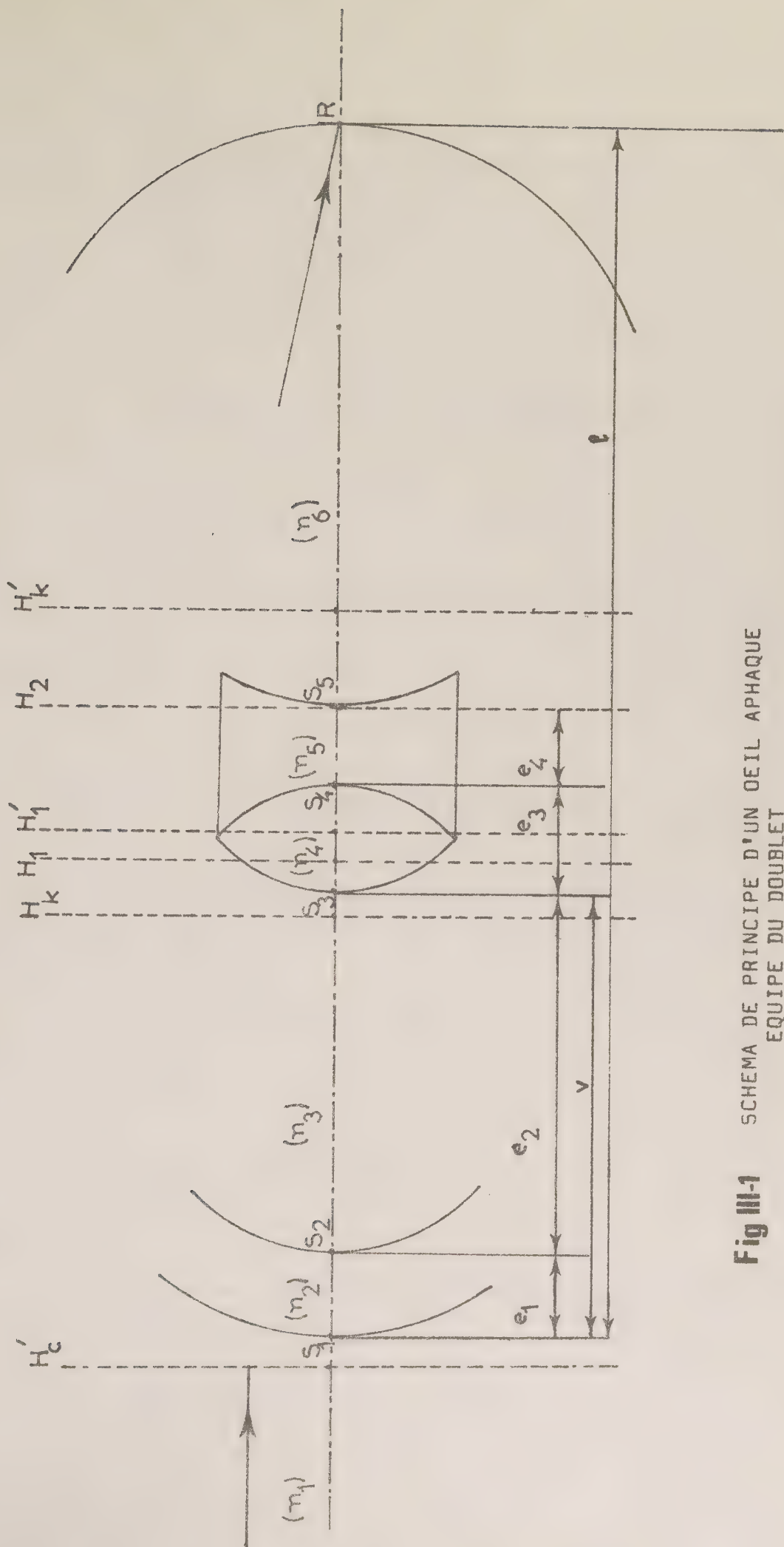


Fig III-1 SCHEMA DE PRINCIPE D'UN OEIL APHAQUE
EQUIPE DU DOUBLET

Ainsi, en appliquant ces formules sur l'oeil équipé du doublet, on obtient l'équation d'échelle :

$$A'_1 \rho_4 + B'_1 \rho_5 + C'_1 = 0 \quad (25)$$

où

$$A'_1 = (n_5 - n_4) + \frac{e_4}{n_5} \cdot \frac{(n_5 - n_4) \times n_6}{(l - (v + e_3 + e_4))}$$

$$B'_1 = (n_6 - n_5) - X_4 (n_6 - n_5) \cdot \frac{e_4}{n_5}$$

$$C'_1 = X_4 - \frac{n_6}{(l - (v + e_3 + e_4))} + X_4 \frac{e_4}{n_5} \times \frac{n_6}{(l - (v + e_3 + e_4))}$$

2 - FORMULATION DE L'EQUATION EXPRIMANT LA CONDITION D'ACHROMATISME

L'aberration chromatique de position, pour un système centré, est donnée par la formule ¹⁵ :

$$\delta x' = - f_0'^2 \sum h_i^2 q_i \cdot \Delta_i \frac{\delta n}{n}, \quad (26)$$

où

$$\Delta_i \frac{\delta n}{n} = \left(\frac{\delta n_{i+1}}{n_{i+1}} - \frac{\delta n_i}{n_i} \right).$$

Dans le cas de l'oeil équipé du doublet, en développant l'équation (26), on obtient :

$$A'_2 \rho_4 + B'_2 \rho_5 + C'_2 = 0 \quad (27)$$

avec :

$$A'_2 = n_4 h_4^2 \left(\frac{\delta n_5}{n_5} - \frac{\delta n_4}{n_4} \right) + 2 \frac{e_4}{n_5} \cdot \frac{(n_5 - n_4) \cdot n_6 \cdot h_4^2}{(l - (v + e_3 + e_4))} \times \left(\frac{\delta n_6}{n_6} - \frac{\delta n_5}{n_5} \right)$$

$$B'_2 = n_6 \times h_4^2 \left(1 - 2 \frac{e_4}{n_5} X_4 \right) \left(\frac{\delta n_6}{n_6} - \frac{\delta n_4}{n_4} \right)$$

$$C'_2 = B_3 + h_3^2 q_3 \left(\frac{\delta n_4}{n_4} - \frac{\delta n_3}{n_3} \right) - X_4 \times h_4^2 \left(\frac{\delta n_5}{n_5} - \frac{\delta n_4}{n_4} \right) -$$

$$\frac{n_6 \cdot h_4^2}{(l - (v + e_3 + e_4))} \times \left(1 - 2 \frac{e_4}{n_5} X_4 \right) \left(\frac{\delta n_6}{n_6} - \frac{\delta n_5}{n_5} \right),$$

et B_3 : aberration chromatique de position due à la cornée, est :

$$B_3 = q_1 \Delta_1 \frac{\delta n}{n} + h_2^2 \cdot q_2 \cdot \Delta_2 \frac{\delta n}{n}.$$

Ainsi les deux équations (25) et (27) étant linéaires par rapport aux courbures, on peut extraire ρ_4 et ρ_5 de ce système. On connaît donc finalement tous les éléments de construction du doublet initial, donnés par le tableau X et les valeurs trouvées pour ρ_4 , ρ_5 :

$$\rho_4 = -164,026 \text{ m}^{-1}$$

$$\rho_5 = -65,0210 \text{ m}^{-1}.$$

B - TERMES ADDITIONNELS D'ABERRATION. RESULTATS DU CALCUL OBTENUS PAR LA METHODE DE MOINDRES CARRES

1 - TERMES ADDITIONNELS D'ABERRATION

Le principe de la méthode appliquée dans la correction de l'oeil aphaque équipé du doublet, est le même que celui indiqué précédemment pour une lentille ; toutefois il faut remarquer une nette différence dans les formules donnant les termes additionnels d'aberration. Dans le cas d'un doublet, ces termes d'aberration deviennent :

1.a. Terme d'aberration S_8 dû à l'écart entre la puissance du doublet et la puissance du cristallin de l'oeil schématique

Puissance du doublet : on suppose que le doublet est une association d'une lentille d'indice n_4 (plongée entre deux milieux d'indices n_3 et n_5), et d'un dioptre séparant deux milieux d'indices n_5 et n_6 (Fig. III.1). Ainsi en appliquant la formule de GULLSTRAND, on peut calculer la puissance totale du doublet.

Soit Q_1 la puissance de la lentille :

$$Q_1 = (n_4 - n_3) \rho_3 + (n_5 - n_4) \rho_4 - \frac{e}{n_4} (n_4 - n_3)(n_5 - n_4) \rho_3 \rho_4,$$

soit Q_2 la puissance du dioptre :

$$Q_2 = (n_6 - n_5) \rho_5.$$

La puissance totale est elle donnée par :

$$D_K^p = Q_1 + Q_2 - \frac{H'_1 H_2}{n_5} Q_2 Q_1$$

où $\overline{H'_1 H_2}$ est l'intervalle entre le plan principal image de la lentille et le plan principal objet du dioptre :

$$\overline{H'_1 H_2} = \overline{H'_1 S_5} = \overline{H'_1 S_4} + \overline{S_4 S_5} = n_5 \cdot \frac{e_3}{n_4} \cdot \rho_3 \frac{(n_4 - n_3)}{Q_1} + e_4$$

On pose :

$$\overline{H'_1 H_2} = E_0,$$

avec : $\overline{H'_1 S_4}$: position du plan principal image de la lentille par rapport au sommet S_4 , tel que :

$$\overline{S_4 H'_1} = -\frac{n_5}{n_4} \cdot e_3 \cdot \rho_3 \frac{(n_4 - n_3)}{Q_1}$$

Ainsi le terme additionnel d'aberration S_8 vaut :

$$S_8 = D_k^p - D_k^h,$$

avec : D_k^p : puissance du doublet,

D_k^h : puissance du cristallin de l'oeil schématique.

1.b. Terme d'aberration S_9 dû à l'écart entre l'intervalle $\overline{H_k H'_k}$ du doublet, et celui du cristallin de l'oeil schématique

L'intervalle $\overline{H_k H'_k}$ du doublet (fig. III.1) est donné par :

$$\overline{H_k H'_k} = \overline{H_k H'_1} + \overline{H'_1 S_5} + \overline{S_5 H'_k} = -\overline{H'_1 H_k} + \overline{H'_1 S_4} + \overline{S_4 S_5} + \overline{S_5 H'_k}$$

Or on sait que :

$$\overline{H_1' H_k} = n_3 \cdot \frac{E_0}{n_5} \cdot \rho_5 \frac{(n_6 - n_5)}{D_k^p}$$

$$\overline{S_4 H_1'} = -n_5 \cdot \frac{e_3}{n_4} \cdot \rho_3 \frac{(n_4 - n_3)}{Q_1}$$

$$\overline{S_4 S_5} = e_4$$

$$\overline{S_5 H_k'} = -n_6 \cdot \frac{E_0}{n_5} \cdot \frac{Q_1}{D_k^p} = \overline{H_2 H_k'}$$

$$\overline{H_k H_k'} = -\overline{H_1' H_k} - \overline{S_4 H_1'} + \overline{S_4 S_5} + \overline{S_5 H_k'}$$

$$= e_4 + \frac{n_5}{n_4} \cdot e_3 \cdot \rho_3 \frac{(n_4 - n_3)}{Q_1} - \frac{E_0}{D_k^p} \left(\frac{n_6}{n_5} Q_1 + \frac{n_3}{n_5} \cdot \rho_5 (n_6 - n_5) \right)$$

Le terme S_9 est alors exprimé par la différence :

$$S_9 = (\overline{H_k H_k'}) - (\overline{H_k H_k'})$$

calculé du cristallin
pour le de l'oeil
doublet schématique.

1.c. Terme d'aberration S_{10} dû à l'écart entre l'intervalle $\overline{H_c' H_k}$ de l'oeil équipé du doublet et celui de l'oeil schématique

L'intervalle $\overline{H_c' H_k}$ de l'oeil équipé par le doublet est donné (fig. III.1)

par :

$$\begin{aligned}
 \overline{H'_C H_K} &= \overline{H'_C S_2} + \overline{S_2 H_K} \\
 &= -\overline{S_2 H'_C} + \overline{S_2 S_4} + \overline{S_4 H'_1} + \overline{H'_1 H_K} \\
 &= -\overline{S_2 H'_C} + \overline{S_2 S_3} + \overline{S_3 S_4} + \overline{S_4 H'_1} + \overline{H'_1 H_K}
 \end{aligned}$$

$\overline{S_4 H'_1}$: position du point principal image de la lentille par rapport au sommet S_4

$$\begin{aligned}
 \overline{S_4 H'_1} &= -n_5 \cdot \frac{e_3}{n_4} \cdot \rho_3 \frac{(n_4 - n_3)}{Q_1} \\
 \overline{S_2 S_3} &= e_2 \\
 \overline{S_3 S_4} &= e_3 \\
 \overline{H'_1 H_K} &= n_3 \cdot \frac{E_0}{n_5} \cdot \rho_5 \frac{(n_6 - n_5)}{D_k^p}, \quad \text{où}
 \end{aligned}$$

$\overline{S_2 H'_C}$: position du point principal image de la cornée par rapport au sommet S_2 .

Ainsi obtient-on :

$$S_{10} = (\overline{H'_C H_K}) \quad - \quad (\overline{H'_C H_K})$$

*de l'oeil
équipé du
doublet*
*de l'oeil
schématique*

1.d. Terme d'aberration S_{11} dû à l'écart entre la puissance de l'oeil corrigé par le doublet et de l'oeil schématique

$$S_{11} = D^p - D_0^h$$

$$D_0^p = D_c + D_k^p - \frac{(\overline{H'_c H_k})}{n_6} \cdot D_c \cdot D_k^p$$

où $(\overline{H'_c H_k})$ correspond à l'oeil corrigé par le doublet et D_0^h est la puissance totale de l'oeil schématique.

2 - RESULTATS DES CALCULS

Après avoir défini les paramètres de départ, et les termes d'aberration du système, on a choisi les trois rayons de courbure du doublet comme paramètres variables. Les résultats obtenus se présentent comme suit :

2.a. Valeur adoptée pour l'accroissement fini.

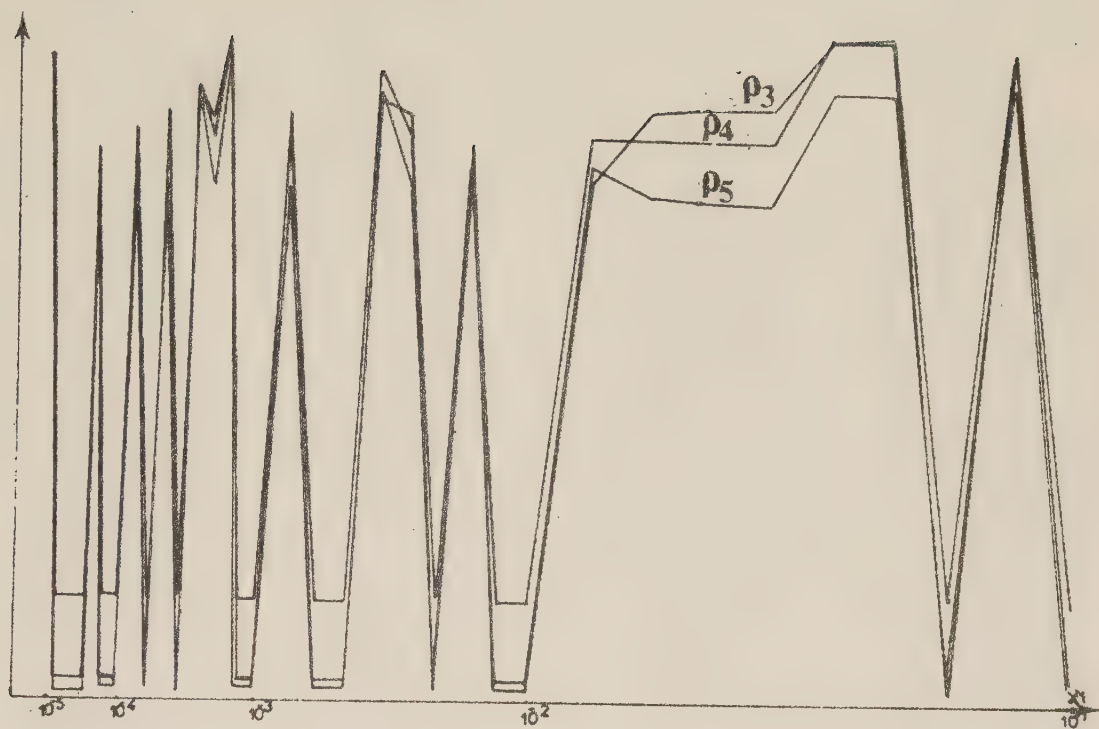
Au cours du calcul les accroissements finis ont été définis par :

$$\delta x_1 = \delta x_2 = \delta x_3 = \rho_3^0 \cdot X1$$

où ρ_3^0 : rayon de courbure de la première surface du doublet

$X1$: paramètre qui varie entre 10^{-1} et 10^{-5} ,

c'est-à-dire variation identique pour toutes les variables. La figure III.2 représente la variation des courbures en fonction de δx ; le tableau XI donne les valeurs obtenues pour ρ_3 , ρ_4 , ρ_5 , Φ_1 , k (nombre d'itérations) pour différentes valeurs de δx . La figure III.2 montre que la région de stabilité des éléments de construction calculés correspond à $\delta x_1 = \delta x_2 = \delta x_3 = \rho_3^0 \times 3 \times 10^{-2}$.



FigIII-2 Courbe de stabilité des courbures en fonction
de l'accroissement fini $\delta x_1 = \rho_3^0 \cdot X1$

TABLEAU XI

[illegible]

Pour cette valeur le système final présente les caractéristiques optiques et géométriques données par le tableau XII.

Caractéristiques	Valeurs numériques
- Rayon de courbure de la première surface du doublet.	$R_3 = \frac{1}{\rho_3} = 10,1619 \text{ (mm)}$
- Rayon de courbure de la deuxième surface du doublet.	$R_4 = \frac{1}{\rho_4} = - 4,7626 \text{ (mm)}$
- Rayon de courbure de la troisième surface du doublet.	$R_5 = \frac{1}{\rho_5} = - 10,2724 \text{ (mm)}$
- Epaisseur du doublet, e	$e = e_3 + e_4 = 0,5 + 0,5 = 1 \text{ (mm)}$
- Diamètre d'ouverture du doublet D .	$D = 3,6 \text{ mm}$
- Fonction de mérite de l'oeil corrigé par le doublet.	$\Phi_1 = 2,36745.10^{-3}$
- Fonction de mérite initiale (de l'oeil corrigé par le doublet calculé par les formules d'optique paraxiale).	$\Phi_0 = 16,9934$

TABEAU XII

2.b. Tolérance sur les paramètres de construction

En adoptant le même critère que celui utilisé pour une lentille (ch. II. D.5), les tableaux XIII a,b,c,d,e,f et les figures III.3.a,b,c,d,e,f montrent que la tolérance sur les rayons de courbure est très réduite ; par

TABLEAU XIII

ϕ_1	$(\phi_1 - \phi_1)/\phi_1$	ρ_3
2.56435	1056.83	88.4068
1.98543	837.638	89.4068
1.53756	648.46	90.4068
1.15807	488.162	91.4068
0.843482	355.283	92.4068
0.58935	247.939	93.4068
0.389836	163.665	94.4068
0.237545	99.3379	95.4068
0.123838	51.3087	96.4068
4.19302E-02	16.7111	97.4068
2.36745E-03	3.93386E-07	98.4068
0.113033	46.7448	99.4068
1.11294	469.1	100.407
11.1226	4697.15	101.407
5243.71	2.21492E+06	102.407
61.886	26139.3	103.407
25.2632	10670	104.407
18.115	7650.69	105.407
15.8196	6681.12	106.407
15.1474	6397.19	107.407
15.2311	6432.53	108.407

-a-

ϕ_1	$(\phi_1 - \phi_1)/\phi_1$	ρ_4
0.563544	237.038	-219.971
0.461185	193.802	-218.971
0.371111	155.755	-217.971
0.292451	122.53	-216.971
0.224256	93.7245	-215.971
0.16553	68.9191	-214.971
0.11533	47.715	-213.971
7.29581E-02	29.8172	-212.971
3.83792E-02	15.2112	-211.971
1.31426E-02	4.55138	-210.971
2.36745E-03	3.93386E-07	-209.971
1.93529E-02	7.17457	-208.971
9.68731E-02	39.9188	-207.971
0.31752	133.119	-206.971
0.906126	381.744	-205.971
2.56767	1063.57	-204.971
8.13122	3433.59	-203.971
36.0507	15226.7	-202.971
667.455	281929	-201.971
373.87	157920	-200.971
73.8378	31187.8	-199.971

-b-

TABLEAU XIII

ϕ_1	$(\phi_1 - \phi_1)/\phi_1$	ρ_5
8.67779	3664.46	-107.348
7.02975	2968.34	-106.348
5.55513	2345.46	-105.348
4.25397	1795.86	-104.348
3.12627	1319.52	-103.348
2.17261	916.447	-102.348
1.39117	586.624	-101.348
0.783805	330.075	-100.348
0.349883	146.789	-99.3484
0.93981E-02	36.7613	-98.3484
2.36745E-03	3.93386E-07	-97.3484
8.87842E-02	36.502	-96.3484
0.348647	146.267	-95.3484
0.781955	329.294	-94.3484
1.38671	585.586	-93.3484
2.16891	915.139	-92.3484
3.12257	1317.96	-91.3484
4.24966	1794.04	-90.3484
5.5502	2343.38	-89.3484
7.0242	2965.99	-88.3484
8.67162	3661.65	-87.3484

-c-

ϕ_1	$(\phi_1 - \phi_1)/\phi_1$	Δ
2.93933	1240.56	-10
2.935	1238.73	-9
2.93063	1236.89	-8
2.9263	1235.05	-7
2.92194	1233.21	-6
2.91764	1231.4	-5
2.9133	1229.56	-4
2.90899	1227.74	-3
2.90466	1225.91	-2
2.90039	1224.11	-1
2.89607	1222.29	0
2.89179	1220.48	1
2.88752	1218.67	2
2.88325	1216.87	3
2.87896	1215.06	4
2.87471	1213.26	5
2.87046	1211.47	6
2.86622	1209.68	7
2.86196	1207.88	8
2.85774	1206.09	9
2.85352	1204.31	10

-f-

TABLEAU XIII

ϕ_1	$(\phi_1 - \phi_1)/\phi_1$	ϕ_3
0.75456	317.723	2.E-04
0.639552	269.144	2.25E-04
0.533301	224.264	2.5E-04
0.436002	183.165	2.75E-04
0.347906	145.954	3.E-04
0.269203	112.71	3.25E-04
0.200148	83.5415	3.5E-04
0.14097	58.5451	3.75E-04
9.19206E-02	37.8302	4.E-04
5.32734E-02	21.5024	4.25E-04
2.52776E-02	9.67716	4.5E-04
8.21416E-03	2.46963	4.75E-04
2.36745E-03	3.93386E-07	5.E-04
8.03366E-03	2.39338	5.25E-04
2.55185E-02	9.77891	5.5E-04
5.51387E-02	22.2903	5.75E-04
9.7223E-02	40.0665	6.E-04
0.152101	63.2468	6.25E-04
0.220141	91.9865	6.5E-04
0.301688	126.432	6.75E-04
0.397134	166.748	7.E-04
0.506872	213.101	7.25E-04
0.63131	265.662	7.5E-04
0.770841	324.6	7.75E-04
0.925936	390.111	8.E-04

-d-

ϕ_1	$(\phi_1 - \phi_1)/\phi_1$	ϕ_4
3.55706E-02	14.0246	2.E-04
3.02927E-02	11.7955	2.25E-04
2.54668E-02	9.75704	2.5E-04
2.11024E-02	7.91357	2.75E-04
1.71946E-02	6.26294	3.E-04
1.37418E-02	4.80445	3.25E-04
1.07459E-02	3.53901	3.5E-04
8.20815E-03	2.46788	3.75E-04
6.12601E-03	1.5876	4.E-04
4.50068E-03	0.90115	4.25E-04
3.33321E-03	0.407932	4.5E-04
2.62207E-03	0.107551	4.75E-04
2.36745E-03	3.93386E-07	5.E-04
2.56982E-03	8.54805E-02	5.25E-04
3.22918E-03	0.363991	5.5E-04
4.34485E-03	0.835246	5.75E-04
5.91706E-03	1.49934	6.E-04
7.94806E-03	2.35722	6.25E-04
1.04339E-02	3.40718	6.5E-04
1.3376E-02	4.64997	6.75E-04
1.67766E-02	6.08637	7.E-04
2.06342E-02	7.71579	7.25E-04
2.49465E-02	9.53728	7.5E-04
2.97153E-02	11.5516	7.75E-04
3.49434E-02	13.7599	8.E-04

-e-

Fig III-3-a

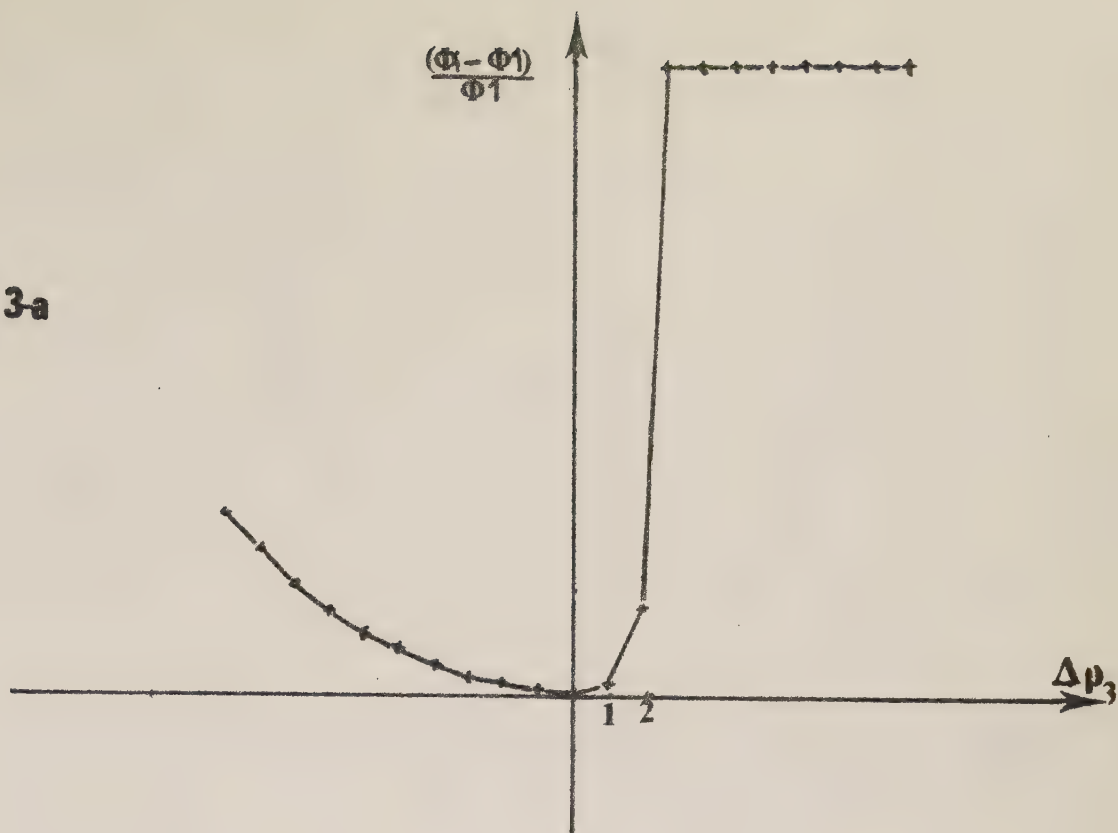


Fig III-3-b

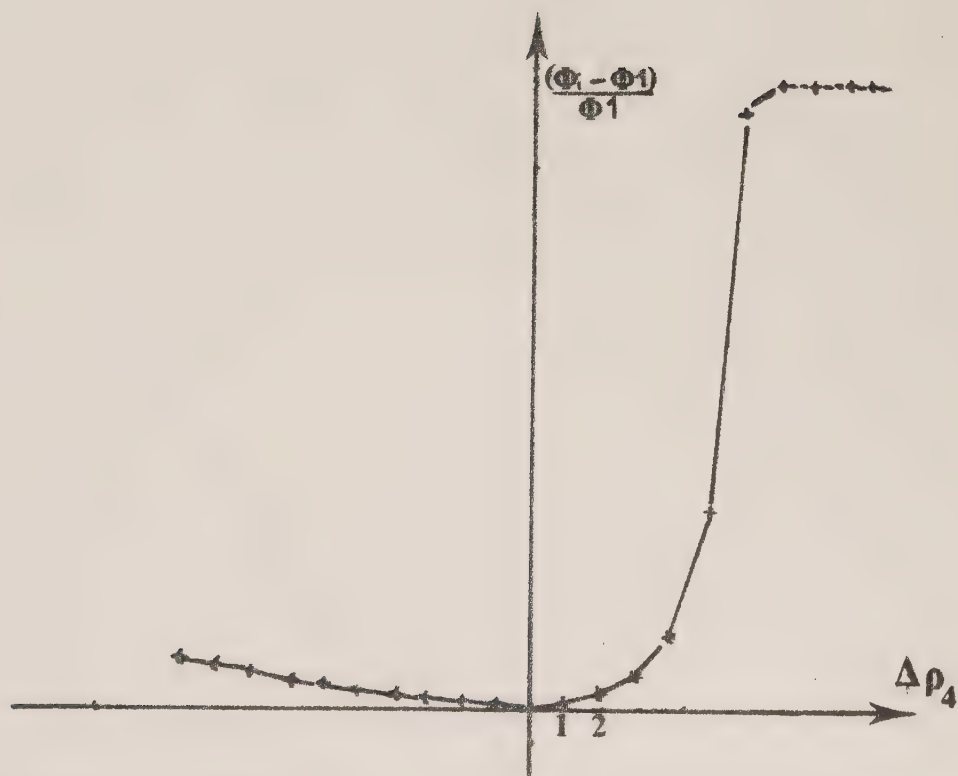


Fig III-3 COURBES D'ETABLISSEMENT DES TOLERANCES SUR LES PARAMETRES DE CONSTRUCTION DU DOUBLET

Fig III-3-c

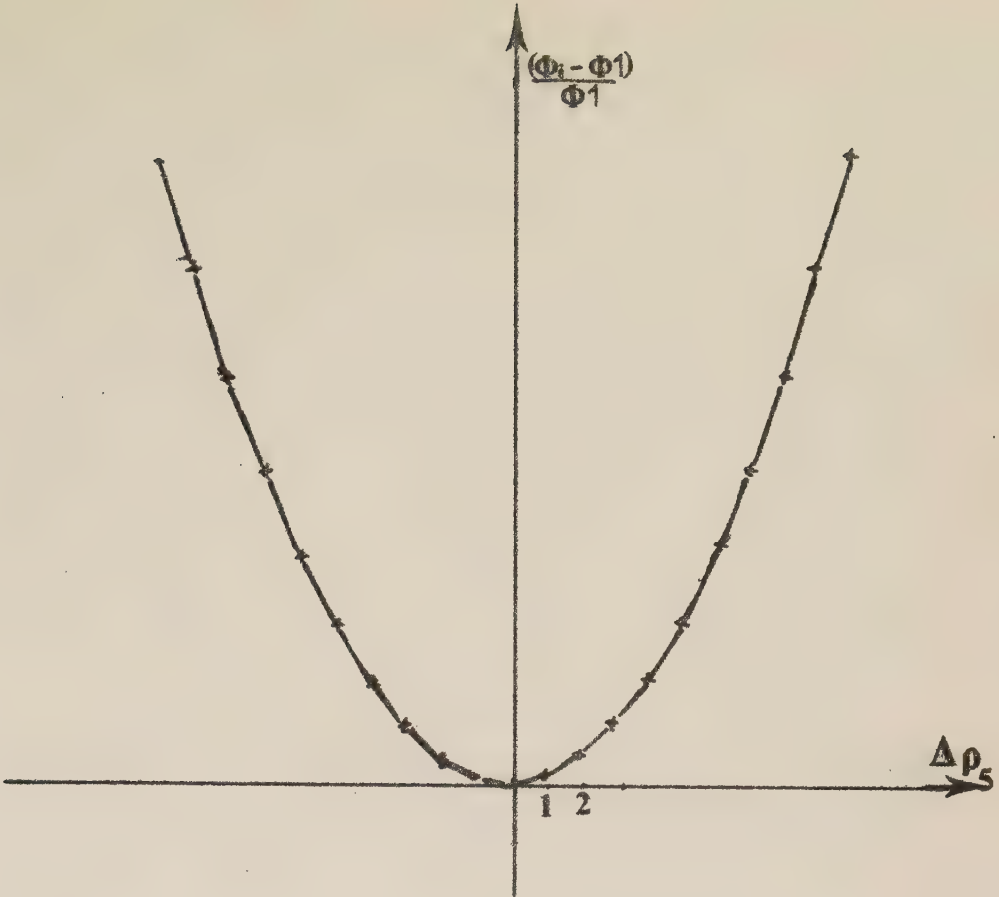


Fig III-3-d

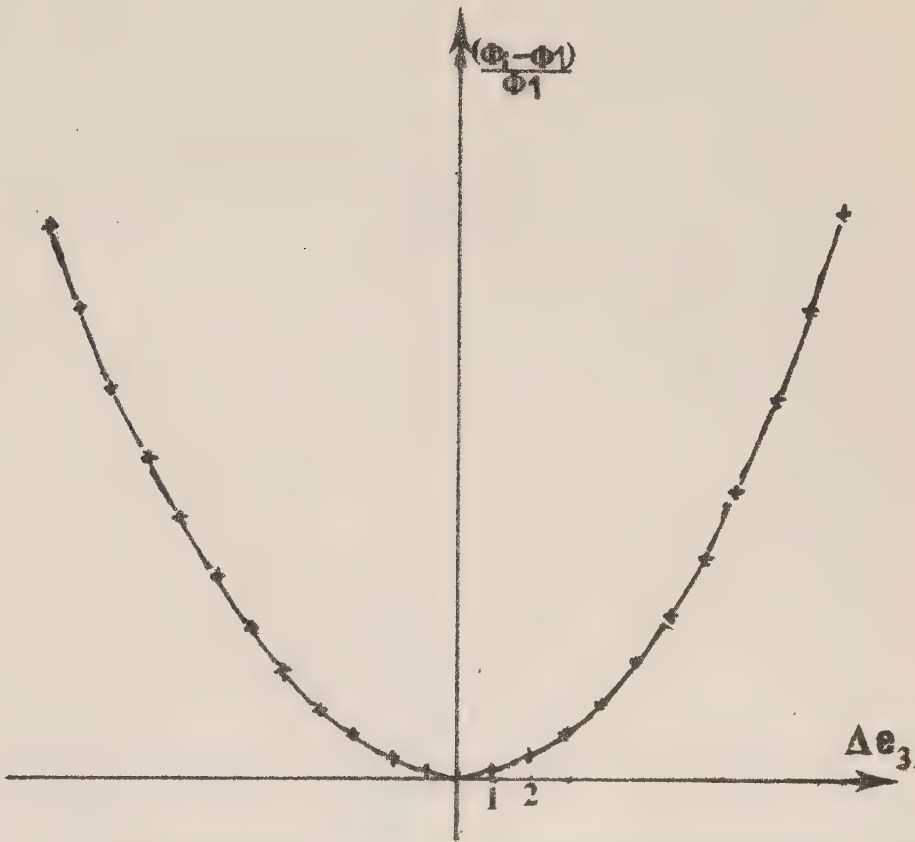


Fig III-3 COURBES D'ETABLISSEMENT DES TOLERANCES SUR LES
PARAMETRES DE CONSTRUCTION DU DOUBLET

Fig III-3e

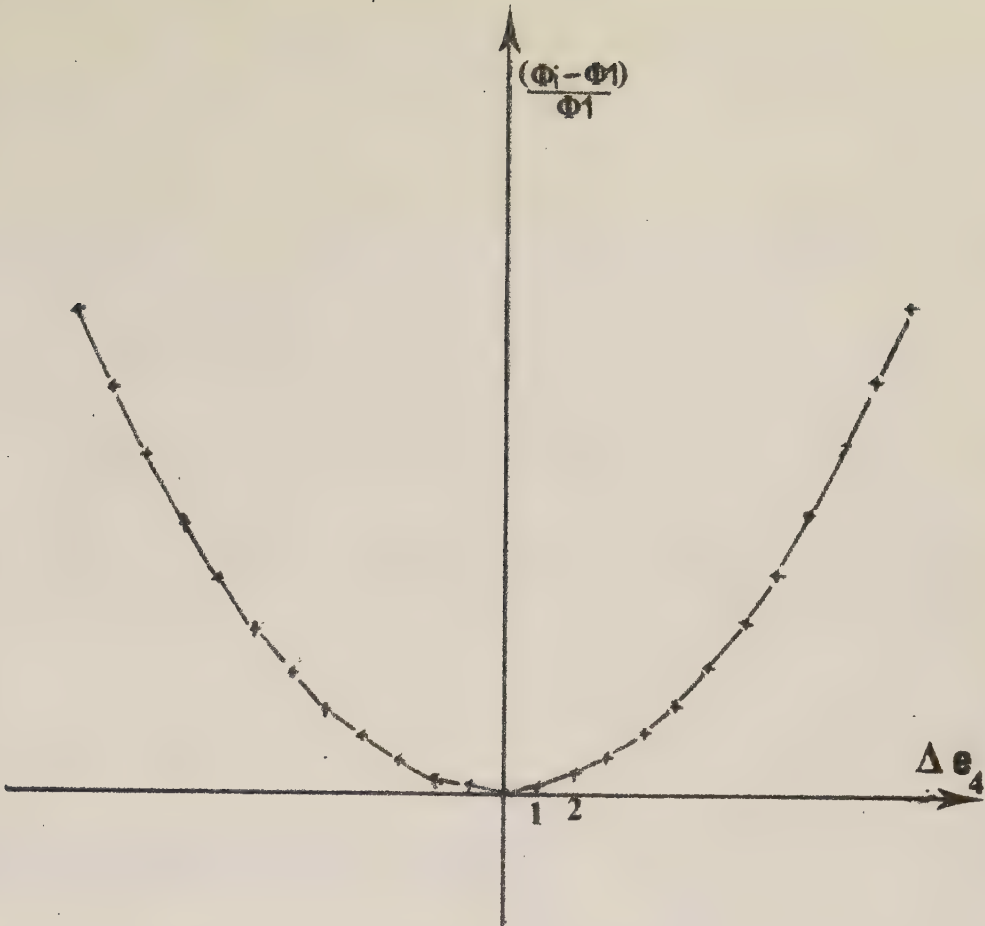


Fig III-3f

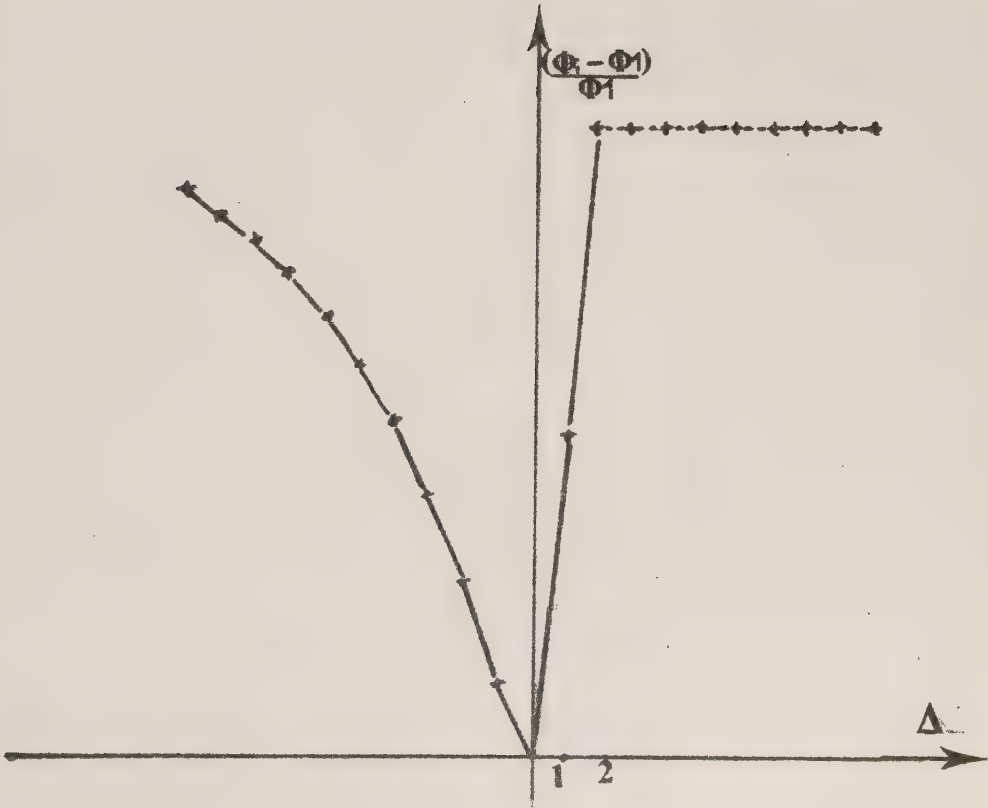


Fig III-3 COURBES D'ETABLISSEMENT DES TOLERANCES SUR LES PARAMETRES DE CONSTRUCTION DU DOUBLET

contre on peut admettre une tolérance plus grande sur les épaisseurs e_3 , e_4 , de l'ordre de :

$$\Delta e_3 < 0,025 \text{ mm}$$

$$\Delta e_4 \approx 0,08 \text{ mm.}$$

Ces résultats montrent que la fabrication du doublet demande une précision importante.

C - INTERPRETATION DES RESULTATS OBTENUS

c.1. Etendue géométrique de la tache image. Forme de la surface image

La figure III.4 représente l'étendue géométrique de la tache image sur la rétine et la marche des rayons à travers l'oeil corrigé pour différents angles d'observation. On constate que le diamètre de la tache image a subi une réduction considérable par rapport à celui de la tache formée par l'oeil schématique (Fig. II.14) ; il passe de 1000 μm environ, dans le cas de l'oeil schématique, à environ 170 μm dans le cas de l'oeil corrigé, ce qui donne à la rétine l'impression d'une image ponctuelle ; de plus, il faut remarquer que la petitesse du diamètre d'ouverture du doublet limite bien la partie utile du faisceau dans ses différentes positions, et limite également le champ de vision. La figure III.5 montre l'allure de la surface image qui contient la tache de moindre diffusion, les surfaces image tangentielle et sagittale. Les rayons de courbure de ces surfaces images sont les suivants :

$$R_m = 10,190 \text{ mm}$$

$$R_t = 8,28 \text{ mm}$$

$$R_s = 12,68 \text{ mm.}$$

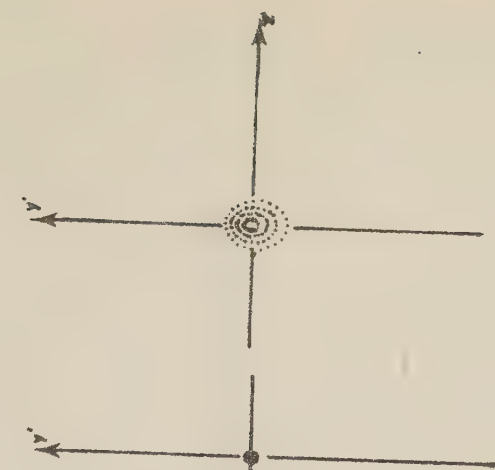
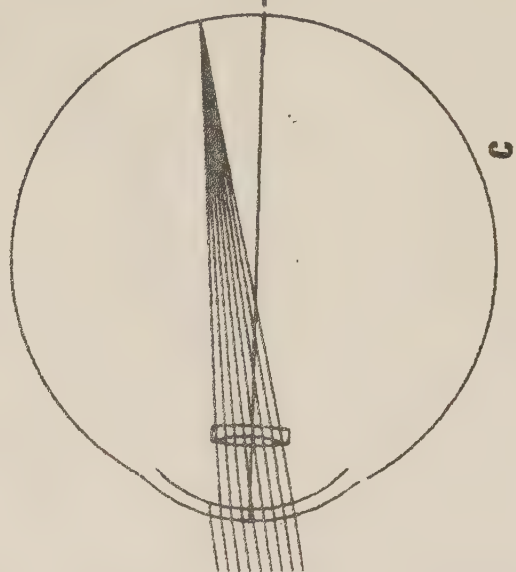
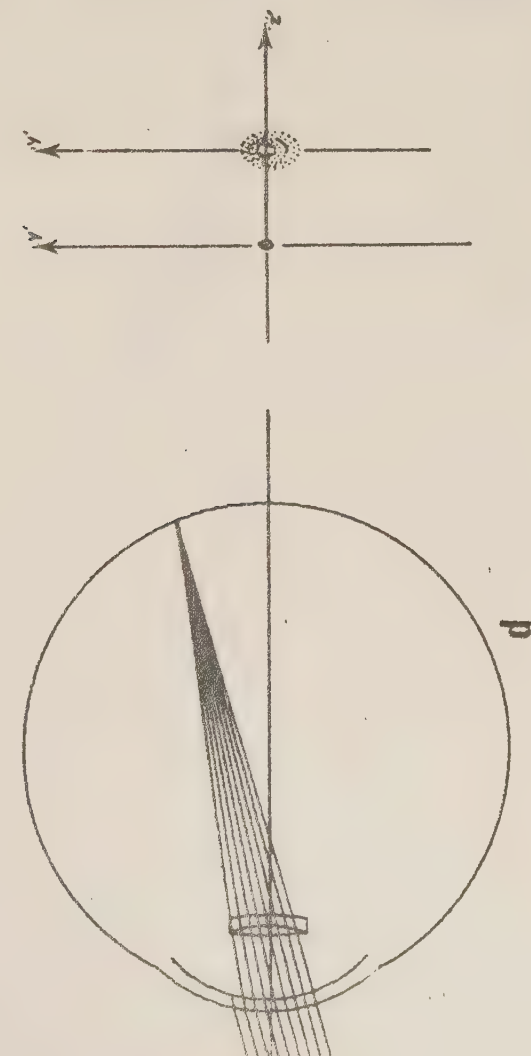
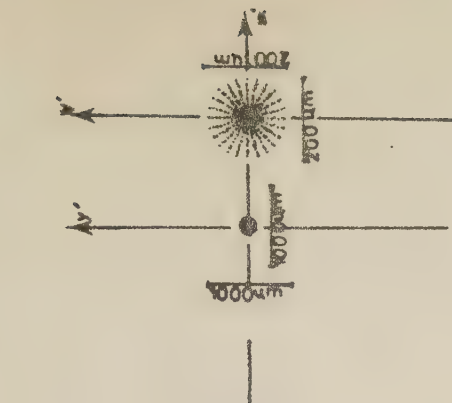
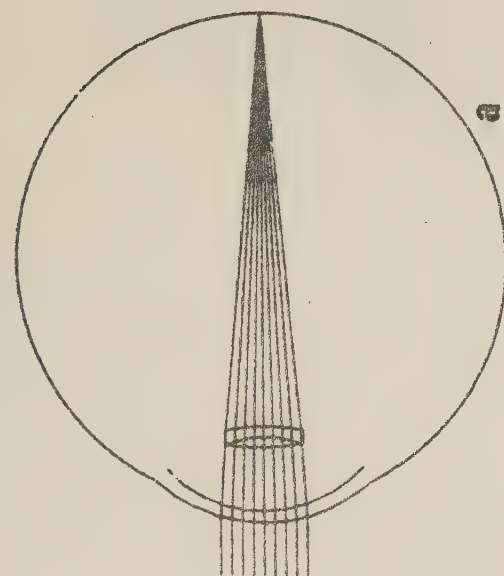
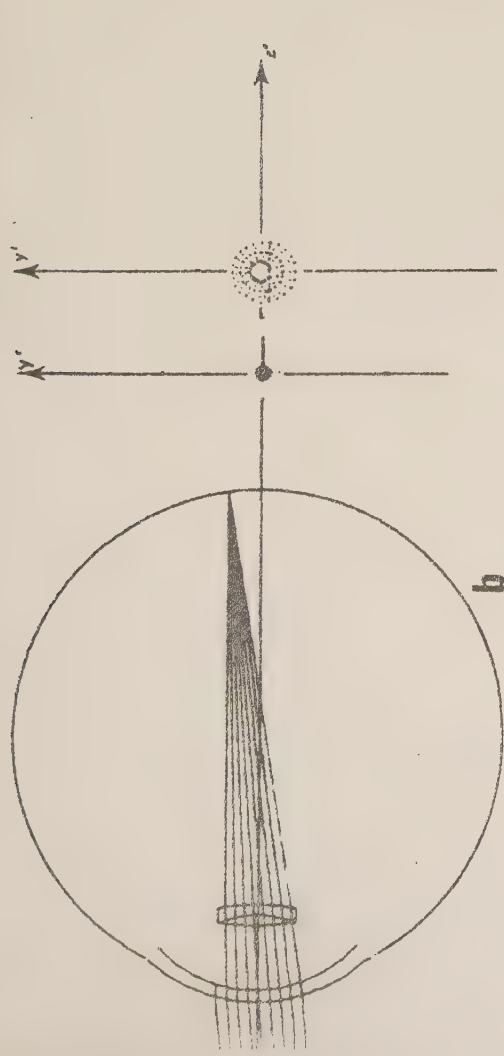
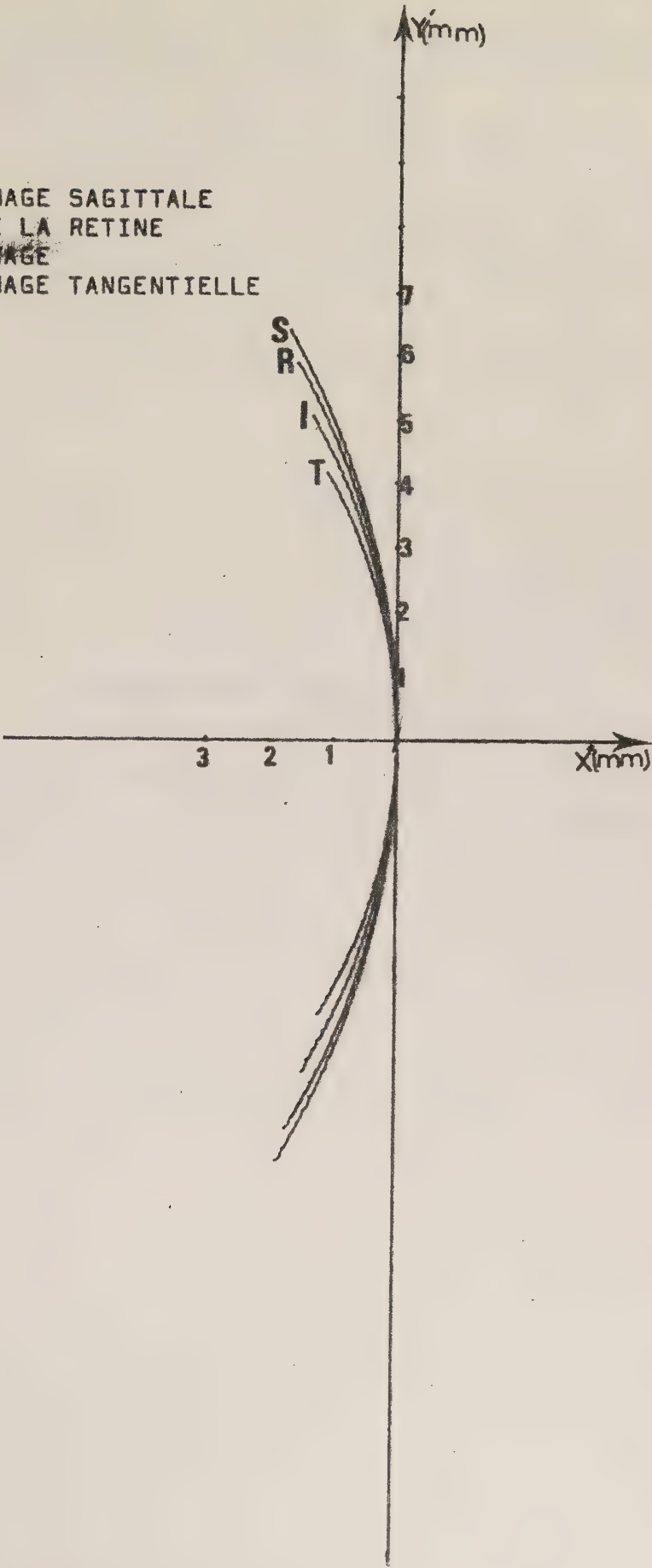


Fig III-4 MARCHÉ DES RAYONS, ET FORME DE LA TACHE IMAGE SUR LA
RETINE POUR DIFFÉRENTES INCLINAISONS θ DES RAYONS
AVEC L'AXE OPTIQUE: a- $\theta=0^\circ$ c- $\theta=10^\circ$
b- $\theta=5^\circ$ d- $\theta=15^\circ$

Fig III-5

- S: SURFACE IMAGE SAGITTALE
- R: SURFACE DE LA RETINE
- I: SURFACE IMAGE
- T: SURFACE IMAGE TANGENTIELLE



c.2. Courbes d'aberration de l'oeil corrigé et de l'oeil schématique

Sur la figure III.6 on a représenté :

- (1) : les courbes d'aberration sphériques
- (2) : les courbes d'aberration de la coma (écart à la condition de sinus)
- (3) : les courbes d'aberration de distorsion.

Les courbes (1) et (2) montrent comment varie l'aberration sphérique et la coma en fonction de la hauteur d'incidence des rayons sur la pupille d'entrée de l'oeil. Les courbes (3) montrent la variation du grandissement transversal en fonction de l'angle de champ. Dans les tableaux XIV a,b,c et XV a,b,c, on donne les valeurs numériques qui ont servies au tracé des courbes d'aberration (1), (2), (3). Le tableau XIV a,b,c correspond à l'oeil corrigé et le tableau XV a,b,c à l'oeil schématique. L'intérêt de la présentation de ces tableaux est que, tout en donnant une idée claire sur les valeurs numériques des diverses aberrations tracées ; ils permettent aussi de comparer facilement les valeurs numériques (de l'oeil corrigé et de l'oeil schématique) de ces aberrations et de montrer l'efficacité de la méthode utilisée dans la correction de l'oeil aphaque. A titre d'exemple, on a, dans le cas de l'oeil schématique, une aberration sphérique égale à $-6,1368.10^{-4} \text{ m}$ (tableau XVI-a) pour une hauteur d'incidence égale à $2,1.10^{-3}$ et pour la même hauteur on trouve dans le cas de l'oeil corrigé (tableau XV.a), une aberration sphérique égale $-6,44567.10^{-5} \text{ m}$. Ces aberrations sont donc dans un rapport de 10 environ.

CONCLUSION

D'après ce qui précède, la combinaison optique qui corrige au mieux l'oeil schématique aphaque est non pas une lentille mais plutôt un doublet, ce qui s'explique par les faits suivants.

-COURBES D'ABERRATIONS
DE L'OEIL CORRIGE PAR
LE DOUBLET

Fig III-6

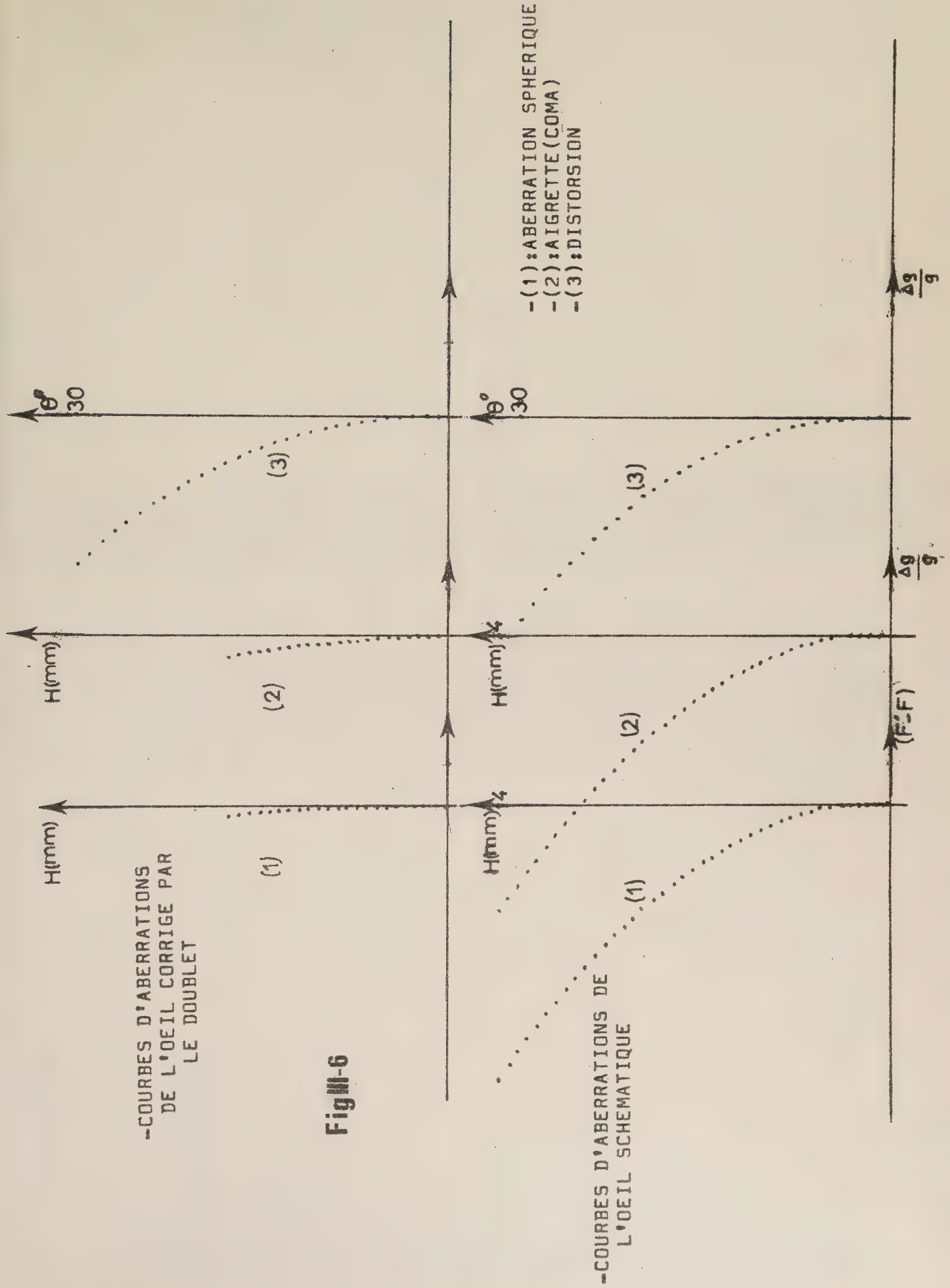


TABLEAU XIV

0: L'ANGLE DE CHAMP

(g-90)/90

- 5. 53564E-05
- 2. 21562E-04
- 4. 99023E-04
- 8. 89417E-04
- 1. 3907E-03
- 2. 0071E-03
- 3. 73916E-03
- 3. 59868E-03
- 4. 5578E-03
- 5. 64696E-03
- 6. 86491E-03
- 8. 2088E-03
- 9. 68408E-03
- 1. 12946E-02
- 1. 30447E-02
- 1. 49391E-02
- 1. 69828E-02
- 1. 91815E-02
- 2. 15414E-02
- 2. 40692E-02
- 2. 67723E-02
- 2. 96585E-02
- 3. 27366E-02
- 3. 60161E-02
- 3. 95071E-02
- 4. 32209E-02
- 4. 71696E-02
- 5. 13664E-02
- 5. 58257E-02
- 6. 05632E-02

-c-

H: HAUTEUR D'INCIDENCE

(g-90)/90

- 1. E-04
- 2. E-04
- 3. E-04
- 4. E-04
- 5. E-04
- 6. E-04
- 7. E-04
- 8. E-04
- 9. E-04
- 1. E-03
- 1. 1E-03
- 1. 2E-03
- 1. 3E-03
- 1. 4E-03
- 1. 5E-03
- 1. 6E-03
- 1. 7E-03
- 1. 8E-03
- 1. 9E-03
- 2. E-03
- 2. 1E-03

-b-

- 1. 52765E-05
- 6. 11061E-05
- 1. 37489E-04
- 2. 44425E-04
- 3. 81914E-04
- 5. 49956E-04
- 7. 4855E-04
- 9. 77699E-04
- 1. 2374E-03
- 1. 52765E-03
- 1. 84846E-03
- 2. 19982E-03
- 2. 58173E-03
- 3. 9942E-03
- 3. 43722E-03
- 3. 91079E-03
- 4. 41492E-03
- 4. 9496E-03
- 5. 51483E-03
- 6. 11062E-03
- 6. 73695E-03

-a-

- 1. 4616E-07
- 5. 84642E-07
- 1. 31545E-06
- 2. 33857E-06
- 3. 65402E-06
- 5. 2618E-06
- 7. 16187E-06
- 9. 35429E-06
- 1. 1839E-05
- 1. 46161E-05
- 1. 76854E-05
- 2. 10471E-05
- 2. 47012E-05
- 2. 86476E-05
- 3. 28861E-05
- 3. 74171E-05
- 4. 22405E-05
- 4. 73561E-05
- 5. 27641E-05
- 5. 84643E-05
- 6. 44567E-05

TABLEAU XV

H: HAUTEUR D'INCIDENCE

F'-F

H: AUTEUR D'INCIDENCE

(9-90)/90

- 1. E-04
- 2. E-04
- 3. E-04
- 4. E-04
- 5. E-04
- 6. E-04
- 7. E-04
- 8. E-04
- 9. E-04
- 1. E-03
- 1. 1E-03
- 1. 2E-03
- 1. 3E-03
- 1. 4E-03
- 1. 5E-03
- 1. 6E-03
- 1. 7E-03
- 1. 8E-03
- 1. 9E-03
- 2. E-03

2. 1E-03

- 3. 2E-03
- 3. 3E-03
- 3. 4E-03
- 3. 5E-03
- 3. 6E-03
- 3. 7E-03
- 3. 8E-03
- 3. 9E-03
- 3. E-03
- 3. 1E-03
- 3. 2E-03
- 3. 3E-03
- 3. 4E-03
- 3. 5E-03
- 3. 6E-03
- 3. 7E-03
- 3. 8E-03
- 3. 9E-03
- 4. E-03

- 1. 39158E-06
- 5. 56632E-06
- 1. 25242E-05
- 2. 22653E-05
- 3. 47895E-05
- 5. 00969E-05
- 6. 81874E-05
- 8. 90611E-05
- 1. 12718E-04
- 1. 39158E-04
- 1. 68381E-04
- 2. 00387E-04
- 2. 35177E-04
- 2. 7275E-04
- 3. 13105E-04
- 3. 56244E-04
- 4. 02166E-04
- 4. 50872E-04
- 5. 0236E-04
- 5. 56632E-04

-6. 13686E-04

- 6. 73524E-04
- 7. 36145E-04
- 8. 01549E-04
- 8. 69736E-04
- 9. 40707E-04
- 1. 01446E-03
- 1. 091E-03
- 1. 17032E-03
- 1. 25242E-03
- 1. 33731E-03
- 1. 42498E-03
- 1. 51543E-03
- 1. 60866E-03
- 1. 70468E-03
- 1. 80348E-03
- 1. 90507E-03
- 2. 00944E-03
- 2. 11659E-03
- 2. 22652E-03

-a-

-b-

- 1. E-04
- 2. E-04
- 3. E-04
- 4. E-04
- 5. E-04
- 6. E-04
- 7. E-04
- 8. E-04
- 9. E-04
- 1. E-03
- 1. 1E-03
- 1. 2E-03
- 1. 3E-03
- 1. 4E-03
- 1. 5E-03
- 1. 6E-03
- 1. 7E-03
- 1. 8E-03
- 1. 9E-03
- 2. E-03
- 2. 1E-03

- 2. 2E-03
- 2. 3E-03
- 2. 4E-03
- 2. 5E-03
- 2. 6E-03
- 2. 7E-03
- 2. 8E-03
- 2. 9E-03
- 3. E-03
- 3. 1E-03
- 3. 2E-03
- 3. 3E-03
- 3. 4E-03
- 3. 5E-03
- 3. 6E-03
- 3. 7E-03
- 3. 8E-03
- 3. 9E-03
- 4. E-03

- 7. 06765E-05
- 2. 82706E-04
- 6. 36088E-04
- 1. 13082E-03
- 1. 76691E-03
- 2. 54435E-03
- 3. 46315E-03
- 4. 52329E-03
- 5. 72479E-03
- 7. 06765E-03
- 8. 55185E-03
- 1. 01774E-02
- 1. 19443E-02
- 1. 38526E-02
- 1. 59023E-02
- 1. 80932E-02
- 2. 04255E-02
- 2. 28992E-02
- 2. 55142E-02
- 2. 82706E-02
- 3. 11683E-02

- 3. 42074E-02
- 3. 73878E-02
- 4. 07096E-02
- 4. 41727E-02
- 4. 77772E-02
- 5. 15231E-02
- 5. 54103E-02
- 5. 94588E-02
- 6. 36087E-02
- 6. 792E-02
- 7. 23726E-02
- 7. 69666E-02
- 8. 17019E-02
- 8. 65785E-02
- 9. 15866E-02
- 9. 67559E-02
- 0. 102057
- 0. 107499
- 0. 117000

TABLEAU XV

 θ : L'ANGLE DE CHAMP $(\theta - 90)/90$

1	-7.76437E-05
2	-3.11567E-04
3	-7.01739E-04
4	-1.24932E-03
5	-1.95364E-03
6	-2.82244E-03
7	-3.85188E-03
8	-5.0465E-03
9	-6.4093E-03
10	-7.94371E-03
11	-9.65362E-03
12	-1.15434E-02
13	-1.3618E-02
14	-1.58828E-02
15	-1.83439E-02
16	-2.10077E-02
17	-2.38816E-02
18	-2.69735E-02
19	-3.02921E-02
20	-3.38468E-02
21	-3.76479E-02
22	-4.17066E-02
23	-4.60351E-02
24	-5.06468E-02
25	-5.5556E-02
26	-6.07784E-02
27	-6.63311E-02
28	-7.22328E-02
29	-7.85036E-02
30	-8.51656E-02

-c-

- Le diamètre de l'image rétinienne de l'oeil corrigé par un doublet est plus petit que celui de l'image rétinienne pour l'oeil corrigé par une lentille.

- Le poids et l'épaisseur du doublet calculé ne présentent aucun inconvénient clinique.

Enfin, si l'implantation d'un tel doublet ne devait pas présenter de difficultés chirurgicales, il ne faut cependant pas sous-estimer celle de la réalisation pratique de ce doublet.

CONCLUSION GENERALE

Abordée au niveau du calcul théorique, l'étude de ce sujet a débuté par une recherche bibliographique se rapportant à l'étude optique de l'oeil, et des différentes méthodes de calcul d'un cristallin artificiel (chapitre I).

Une part importante du travail a été consacrée au calcul d'un cristallin artificiel corrigeant au mieux l'oeil schématique aphaque envisagé (chapitre II, III) ; la méthode de calcul utilisée consiste à déterminer les composantes optiques du cristallin, minimisant les aberrations géométriques et chromatiques de l'image qui se forment sur la rétine. L'étude de la qualité de cette image est faite à l'aide du tracé automatique de la marche des rayons à travers l'ensemble des dioptries de l'oeil.

Nous avons poursuivi nos investigations théoriques afin de préciser les tolérances sur les paramètres de construction du cristallin (obtenus à la fin du calcul, chapitre II, III).

Tous les calculs établis dans ce travail ont conduit aux solutions suivantes:

- 1 - Solutions A et B (chapitre II)
 - Solution A : lentille d'épaisseur 5,84mm
 - Solution B : lentille d'épaisseur 0,6mm

Les caractéristiques optiques et géométriques, la forme de la tache de diffusion sur la rétine, le tracé de la marche des rayons (pour une inclinaison du faisceau de 0°) et la forme des surfaces images (sagittale - tangentielle - de moindre diffusion - rétine) correspondant à deux solutions sont résumés dans les tableaux XVI, XVII.

Dans la solution A, l'épaisseur et le poids de la lentille la rendent inutilisable en tant qu'implant.

La solution B convient sur le plan pratique, par contre sa tache de diffusion sur la rétine a des dimensions qui ne sont pas négligeables.

- 2 - Solution C (chapitre III) :
doublet d'épaisseur 1mm

Les résultats obtenus dans ce cas sont incontestablement positifs (voir tableau XVIII) ; il semble que cette solution ne présente aucun inconvénient clinique.

Enfin, pour faciliter la comparaison entre l'oeil schématique adopté et l'oeil corrigé, on a représenté dans le tableau XIX toutes les caractéristiques concernant l'oeil schématique.

Par ailleurs, le laboratoire a fait déterminer les paramètres d'une lentille asphérique satisfaisant aux conditions imposées par l'étude du cristallin par le Centre de Recherche et de Calculs Optiques (CERCO). Une annexe résume les résultats qui peuvent être comparés à ceux obtenus au cours de notre travail.

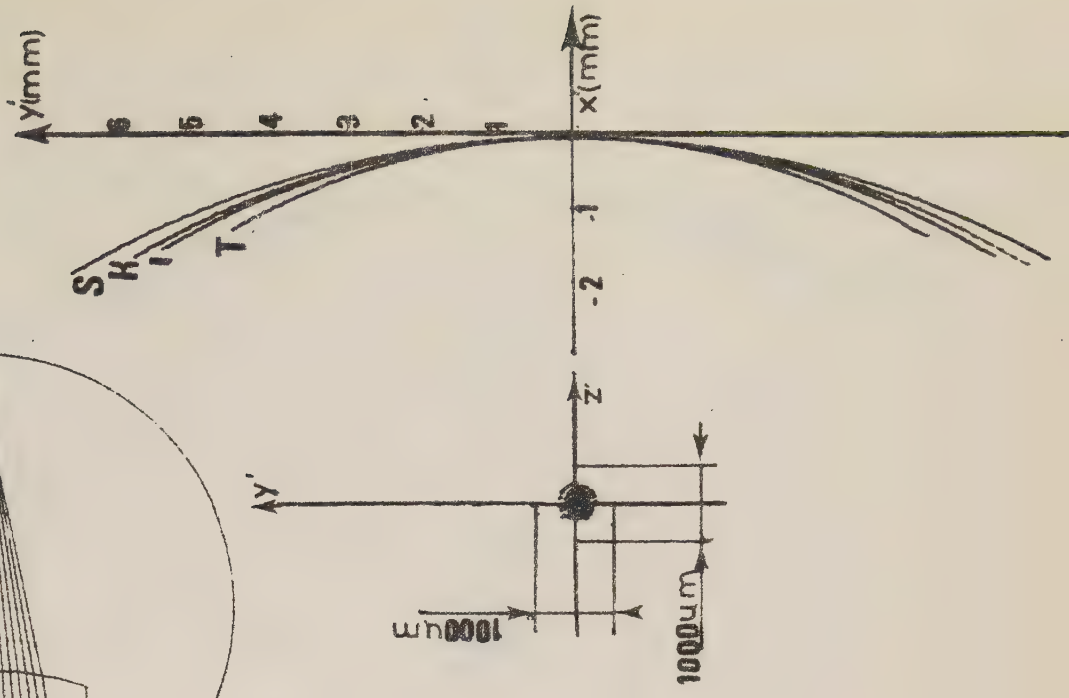
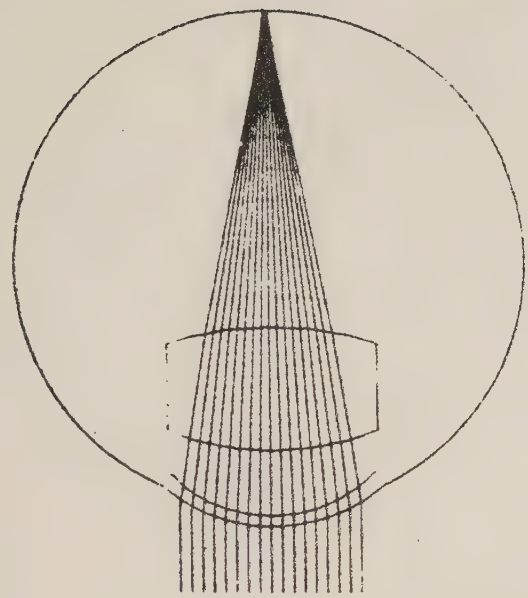
Dans le cadre de ce travail nécessairement limité dans le temps, nous n'avons pas abordé tous les problèmes susceptibles d'être développés dans ce domaine.

Des efforts doivent donc s'orienter vers le calcul d'un cristallin artificiel (de forme et d'hétérogénéité d'indice déterminées) en fonction des paramètres susceptibles d'être mesurés systématiquement sur l'oeil aphaque, ainsi que vers l'étude du spectre de transmission de ce cristallin dans le visible.

TABLEAU XVI

ELEMENTS CARACTERISTIQUES DE LA LENTILLE
d'épaisseur 5,848mm

(Rayon de courbure de la face antérieure (en mm):	12,7
(Rayon de courbure de la face postérieure (en mm):	-15,4
(Epaisseur (en mm):	5,848
(Indice de réfraction,.....	1,49166
(Diamètre d'ouverture (en mm):	9,4
(Puissance (en dpt):	21,78



CARACTERISTIQUES DE L'OEIL (lentille implantée)

(Puissance de l'oeil (en dpt):	59,9399
(Diamètre de la tache image sur la rétine, environ (en μm):	400
(Diamètre de la surface image sagittale (S) (en mm):	26,66
(Diamètre de la surface image tangentielle (T) (en mm):	18,14
(Diamètre de la surface image qui contient la tache de moindre diffusion (I) (en mm):	21,16
(Anisiconie.....	1,7.10 ⁻⁶

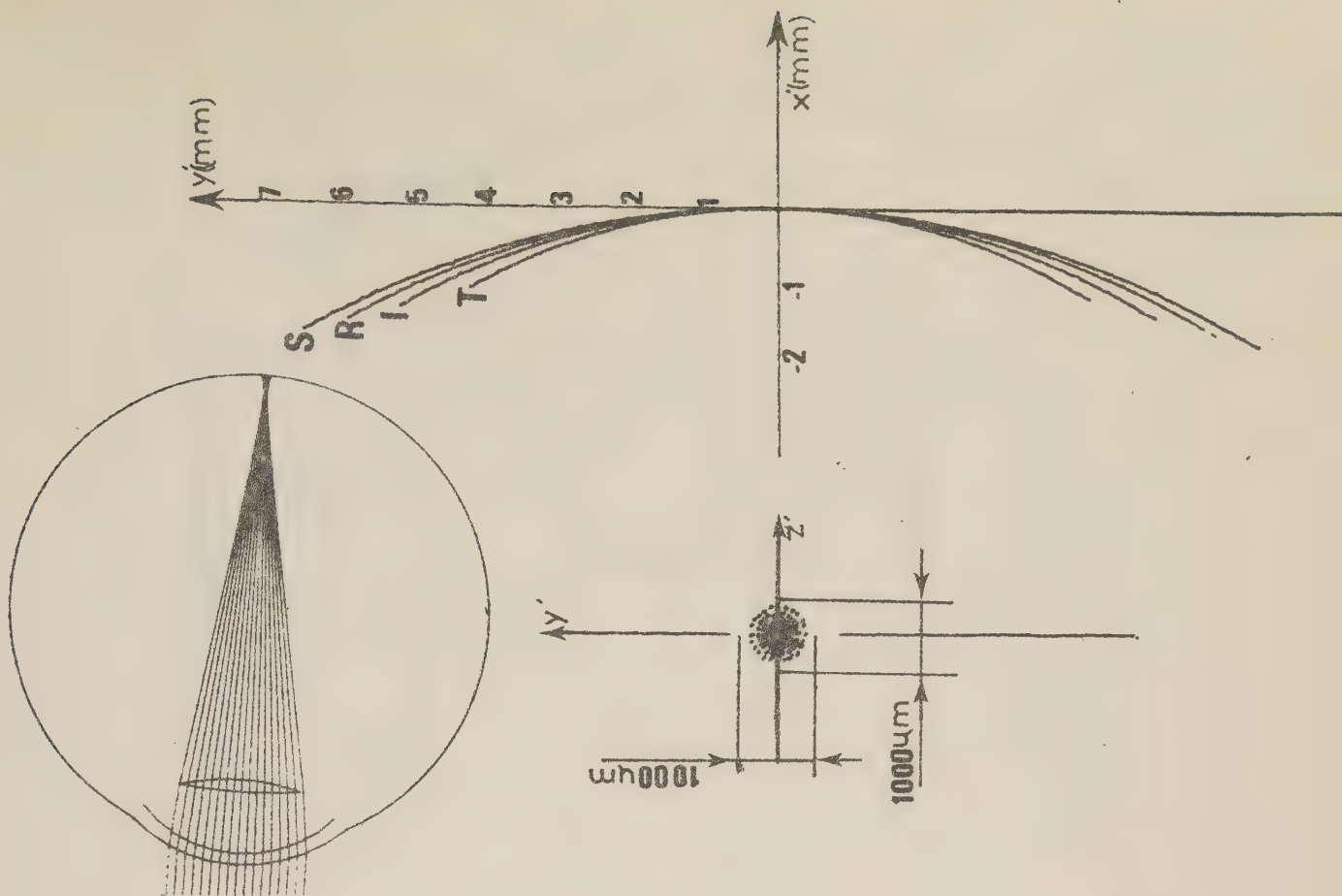
TABLEAU XVII

ELEMENTS DE CONSTRUCTION DE LA LENTILLE
d'épaisseur 0,6mm

(Rayon de courbure de la face antérieure (en mm)..	: 24,7976
(Rayon de courbure de la face postérieure (en mm).	: -10,4460
(Epaisseur (en mm).....	: 0,6
(Indice de réfraction.....	: 1,49166
(Diamètre d'ouverture (en mm).....	: 6
(Puissance (en dpt).....	: 21,0849

CARACTERISTIQUES DE L'OEIL (lentille implantée)

(Puissance de l'oeil (en dpØ).....	: 60,7467
(Diamètre de la tache image sur la rétine, (en µm)	: ≈800
(Diamètre de la surface image sagittale (S) (en mm)	: 25,72
(Diamètre de la surface image tangentielle (T) (en mm).....	: 16,66
(Diamètre de la surface image qui contient la tache de moindre diffusion (I) (en mm).....	: 20,22
(Anisiconie.....	: 1,32 %



TABEAU XVIII

ELEMENTS DE CONSTRUCTION DU DOUBLET ACHROMATIQUE
d'épaisseur 1mm

(	Rayon de courbure de la première surface (en mm)	:	10,1619	)
(	Rayon de courbure de la 2ème surface (en mm)....	:	-4,7626	)
(	Rayon de courbure de la 3ème surface (en mm)....	:	-10,2724	)
(	Epaisseur (en mm).....	:	$e_T = 1$	)
(		:	$e_1 = 0,5$	)
(		:	$e_2 = 0,5$	)
(		:		)
(	Indice de réfraction.....	:	$n_1 = 1,49166$	)
(		:	$n_2 = 1,56735$	)
(	Diamètre d'ouverture. (en mm).....	:	3,8	)
(	Puissance (en dpt).....	:	21,7799	)
(		:		)

CARACTERISTIQUES DE L'OEIL (doublet implanté)

(	Puissance de l'oeil (en dpt).....	:	59,9409	)
(	Diamètre de la tache image sur la rétine (en μm)	:	≈ 170	)
(	Diamètre de la surface image sagittale (S) (en mm):	:	25,36	)
(	Diamètre de la surface image tangentielle (T)	:		)
(	(en mm).....	:	16,56	)
(		:		)
(	Diamètre de la surface image qui contient la	:		)
(	tache de moindre diffusion (I) (en mm).....	:	20,38	)
(	Aniseiconie.....	:	$1,5 \cdot 10^{-5}$	)
(		:		)

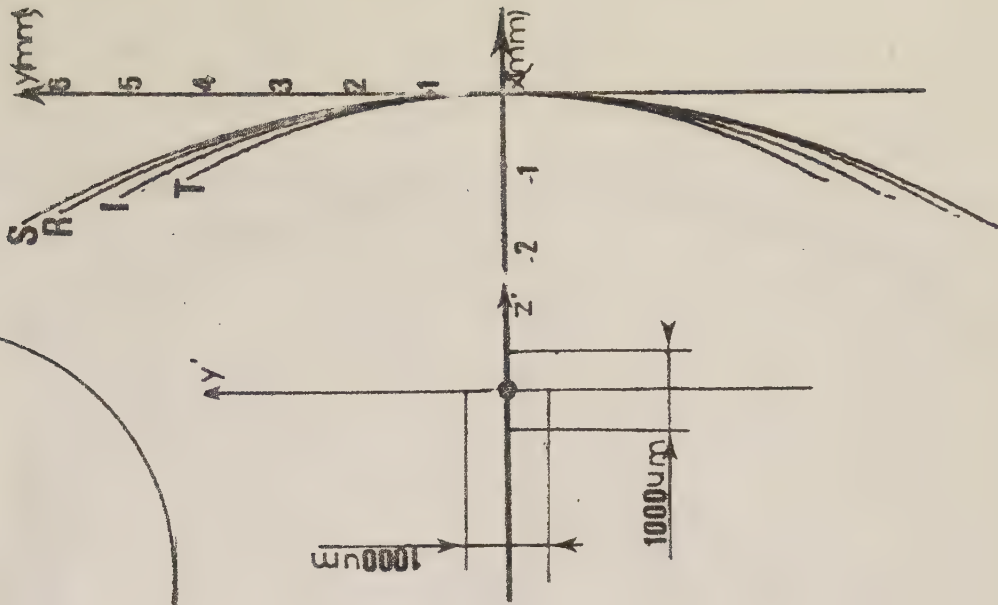
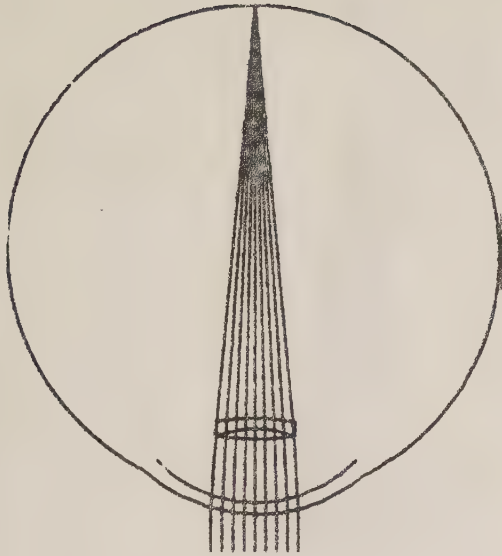
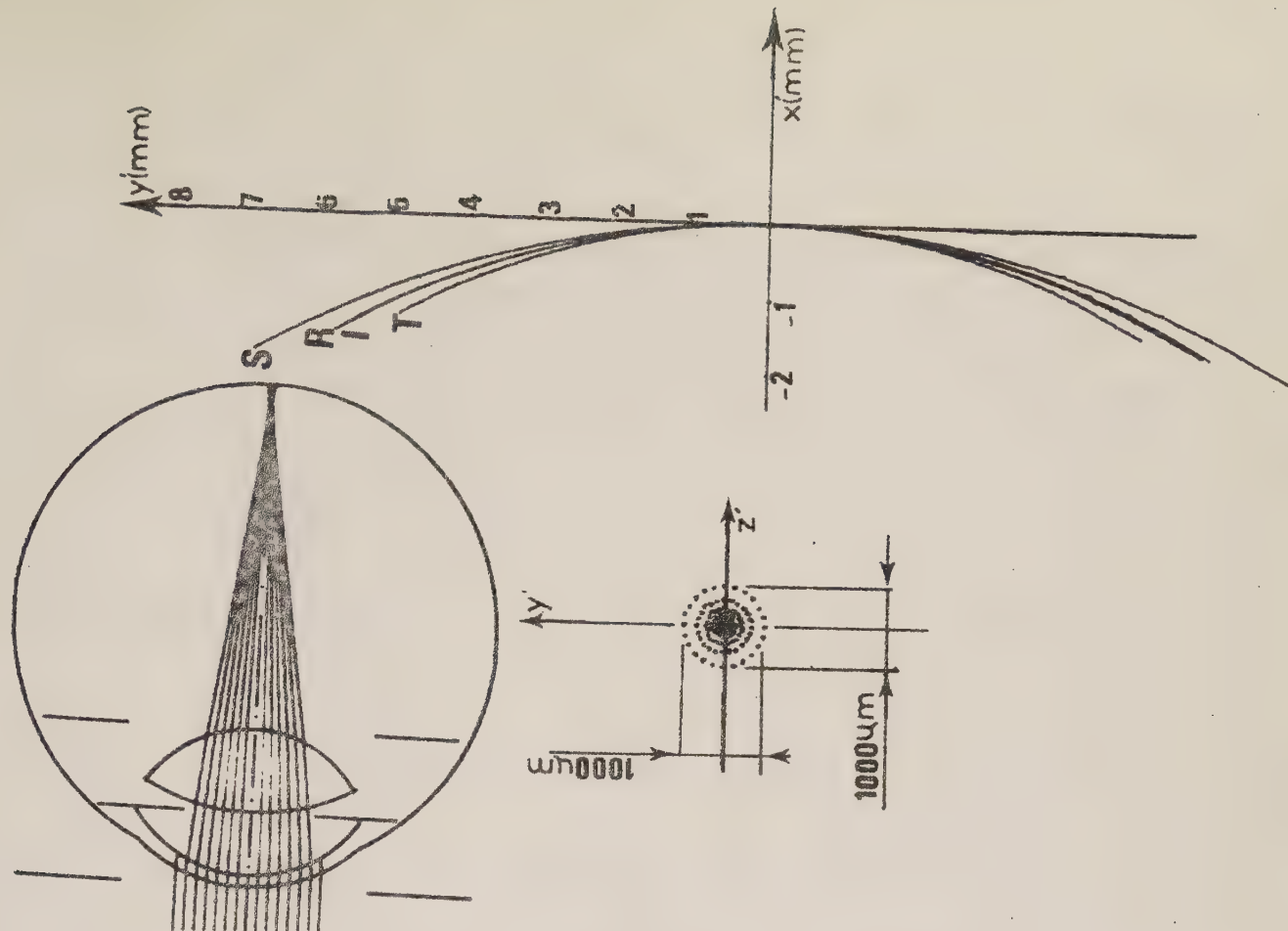


TABLEAU XIX

ELEMENTS DE L'OEIL SCHEMATIQUE (emmetrope)

<u>CRISTALLIN</u>	
Rayon de courbure de la face antérieure (en mm)	10,2
Rayon de courbure de la face postérieure (en mm)	-6
Epaisseur (en mm)	4
Indice de réfraction	1,42
Diamètre d'ouverture (en mm)	10,18
Puissance (en dpt)	21,78
<u>OEIL</u>	
Puissance de l'oeil (en dpt)	59,94
Diamètre de la tache image de l'oeil schématique (en μm)	$\approx 1\ 000$
Diamètre de la surface image sagittale (S)(en mm)	27,60
Diamètre de la surface image tangentielle (T).. (en mm)	19,44
Diamètre de la surface image qui contient la tache de moindre diffusion (I) (en mm)	23,02



ANNEXE

Une lentille asphérique a été calculée par le Centre de Recherches et de Calculs Optiques (CERCO), les résultats du calcul sont présentés dans la page 72

Pour montrer l'influence des termes $\sum_i E_i y^{2i}$ (voir page 72) sur l'équation de la méridienne :

$$X = \frac{y^2}{2R} + \sum_{i=1}^5 E_i y^{2i},$$

on a tracé les courbes :

$$X_{(1)} = \frac{y^2}{2R},$$

$$X_{(2)} = \frac{y^2}{2R} + E_2 y^4,$$

$$X_{(3)} = \frac{y^2}{2R} + E_2 y^4 + E_3 y^6,$$

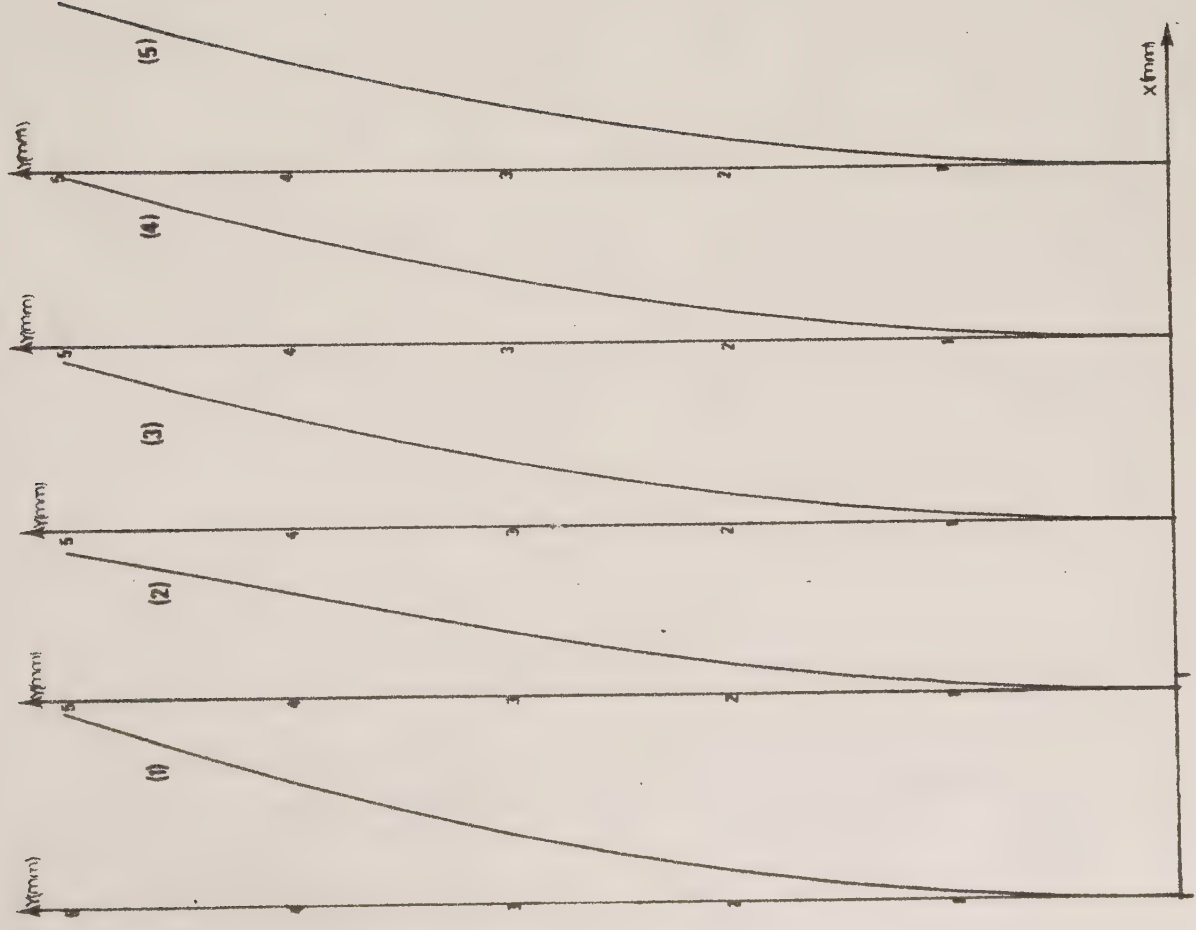
$$X_{(4)} = \frac{y^2}{2R} + E_2 y^4 + E_3 y^6 + E_4 y^8,$$

$$X_{(5)} = \frac{y^2}{2R} + E_2 y^4 + E_3 y^6 + E_4 y^8 + E_5 y^{10},$$

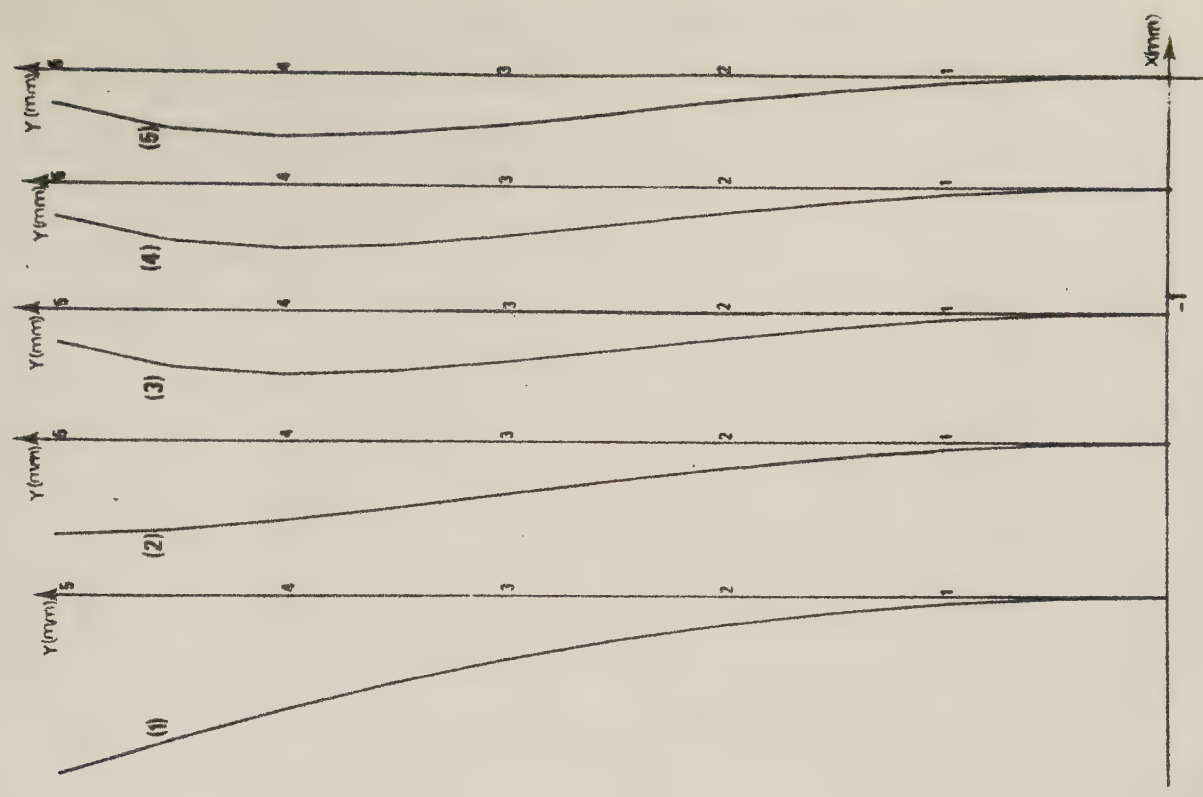
pour chaque solution (A et B) et pour chaque surface.

Les courbes Fig. a - 1, et Fig. a - 2 représentent $X_{(1)}$, $X_{(2)}$, ..., $X_{(5)}$ respectivement pour les surfaces antérieures et postérieures de la lentille (solution A). Les courbes Fig. a - 3 et a - 4 représentent celles de la solution B.

De ces courbes, il résulte essentiellement que les termes $E_i y^{2i}$ (avec $i \geq 2$) peuvent être légitimement négligés devant $\frac{y^2}{2R}$ pour des valeurs de y suffisamment petites. Mais lorsque y croît, ces termes deviennent prépondérants et interviennent dans la correction de l'image rétinienne. Ceci s'explique par le fait que les termes $E_i y^{2i}$ introduisent une déformation des surfaces (antérieures et postérieures) de la lentille. Ainsi, les points d'incidence des rayons sur ces surfaces se déplacent et les rayons de courbure sagittale et tangentielle de ces surfaces sont modifiés, ce qui minimise les aberrations du système et améliore la qualité de l'image définitive.

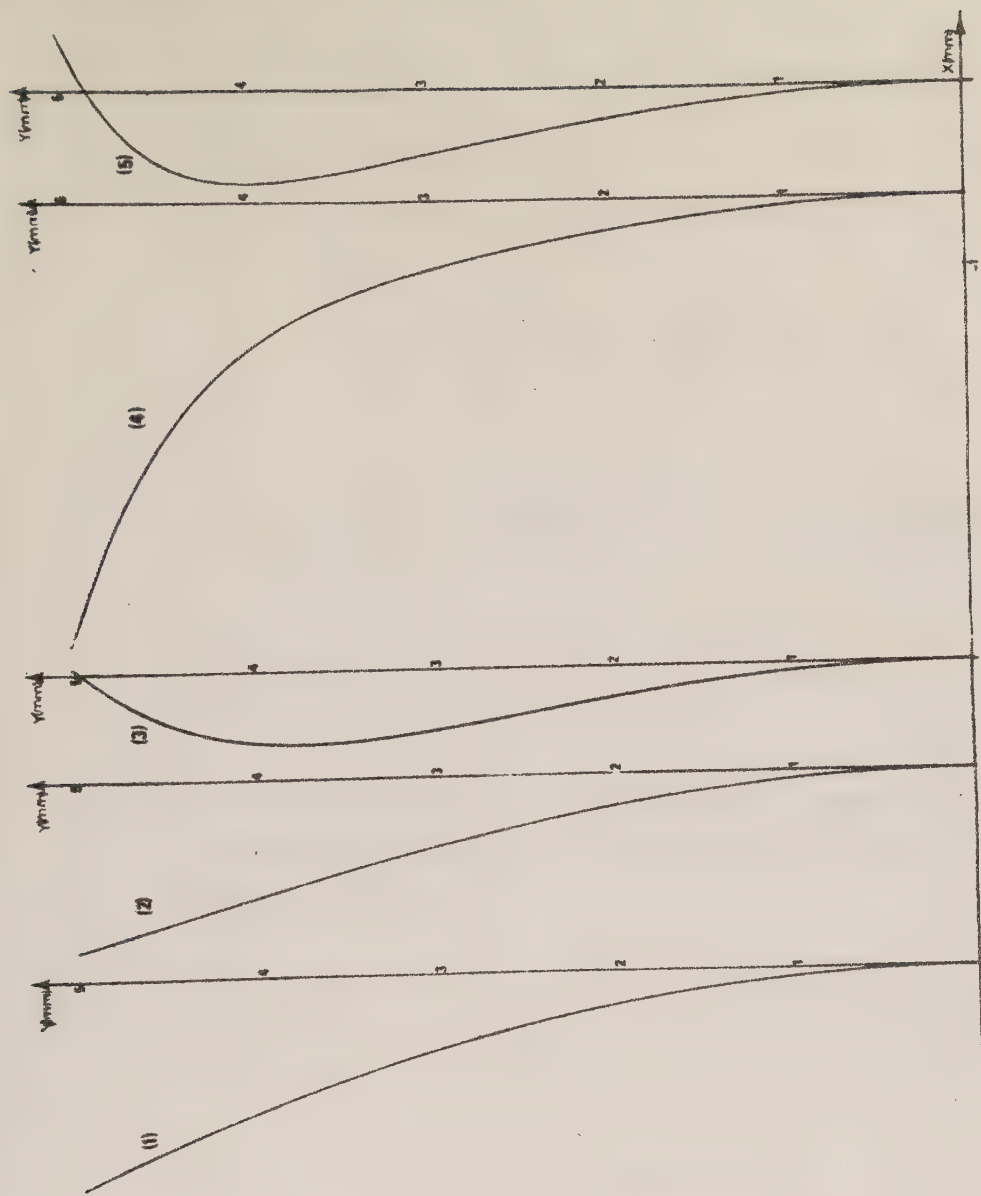


a-1 MERIDIENNES DE LA SURFACE ANTERIEURE DE LA LENTILLE
 ASPHERIQUE LORSQUE L'ON FAIT INTERVENIR 1,2,3,4,5
 TERMES DANS L'EQUATION DE LA PAGE



a-2 MERIDIENNES DE LA SURFACE POSTERIEURE DE LA LENTILLE
 ASPHERIQUE LORSQUE L'ON FAIT INTERVENIR 1,2,3,4,5
 TERMES DANS L'EQUATION DE LA PAGE

-SOLUTION A -



a-4 MERIDIENNES DE LA SURFACE POSTERIEURE DE LA LENTILLE
 ASPHERIQUE LORSQUE L'ON FAIT INTERVENIR 1,2,3,4,5
 TERMES DANS L'EQUATION DE LA PAGE

-SOLUTION B -



a-3 MERIDIENNES DE LA SURFACE ANTERIEURE DE LA LENTILLE
 ASPHERIQUE LORSQUE L'ON FAIT INTERVENIR 1,2,3,4,5
 TERMES DANS L'EQUATION DE LA PAGE

La combinaison optique adoptée est une lentille biconvexe d'indice $n = 1,49471$, dont les surfaces sont asphérisées ; l'équation de la méridienne est :

$$X = \frac{Y^2}{2 R} + \sum_{i=2}^{i=5} E_i Y^{2i}$$

x, y sont les coordonnées d'un point de la méridienne.

x = abscisse

y = ordonnée

R est le rayon de la sphère osculatrice.

E_i est un coefficient de déformation.

Deux solutions A et B sont proposées ; l'une d'épaisseur $S_3 S_4 = 4\text{mm}$

l'autre d'épaisseur $S_3 S_4 = 3\text{mm}$. Dans les deux cas les distances $S_1 S_3$ et $S_1 S_5$ sont conservées.

Pour chacune des solutions nous vous présentons un ensemble de spot-diagrams figurants l'allure, sur la rétine, de la tache de diffusion, pour divers champs d'observation : $0^\circ, \pm 7,5^\circ, \pm 15^\circ, \pm 22,5^\circ$.

Les deux solutions ont été optimisées pour une pupille de diamètre 8mm et un champ d'observation de $\pm 1^\circ$.

Pour information, nous présentons également les spots-diagrams de la tache de diffusion sur la rétine de l'oeil schématisé pour différents champs d'observation.

25

20

15

10

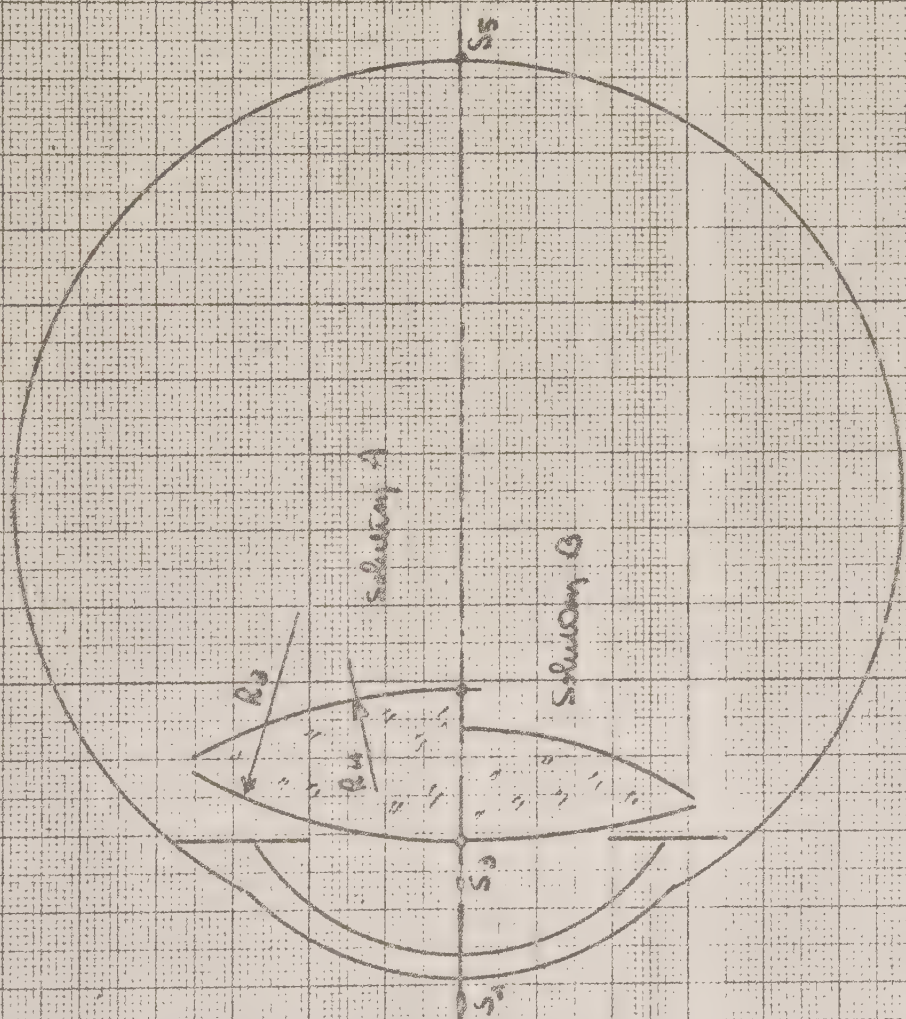
5

0

5

10

15



Edm. 5/0

Cristallin artificiel : Solution A

$$R_3 = + 14,080 \text{ mm}$$

$$R_4 = - 15,330 \text{ mm}$$

$$n_3 = 1,49471$$

$$S_3 S_4 = 4,0 \text{ mm}$$

Equation de la surface 3

$$X = \frac{Y^2}{2 \times 14,080} + (-0,335149. 10^{-3} \times Y^4) + (0,626237. 10^{-5} \times Y^6) + (0,116987. 10^{-7} \times Y^8) + (0,192422. 10^{-12} \times Y^{10})$$

Equation de la surface 4

$$X = \frac{Y^2}{2 \times (-15,330)} + (0,613032. 10^{-3} \times Y^4) + (0,180359. 10^{-4} \times Y^6) + (-0,280727. 10^{-8} \times Y^8) + (-0,333752. 10^{-13} \times Y^{10})$$

Solution A

COURBURE= .710219E-01 RAYON= 14.03.2 LAMBDA= .000000E+00

E 2=-.335149E-03 E 3= .626237E-05 E 4= .116987E-07 E 5= .192422E-12

Y MAX = 5.10000 PAS SUR Y =1.000000E-01 YO= .000000E+00

HAUTEUR Y3	SPHERE	QUADRATIQUE	SURFACE X3	DN/DY	DE/DY2
.000000E+00	.000000E+00	.000000E+00	.000000E+00	.000000E+00	.000000E+00
1.000000E-01	.355114E-03	.355114E-03	.355114E-03	.355000E-02	.355000E-01
.200000	.142051E-02	.142051E-02	.141977E-02	.106489E-01	.700813E-01
.300000	.319635E-02	.319635E-02	.319634E-02	.177366E-01	.700771E-01
.400000	.568290E-02	.568290E-02	.567944E-02	.248671E-01	.707047E-01
.500000	.888054E-02	.888054E-02	.885699E-02	.318534E-01	.704633E-01
.600000	.127898E-01	.127898E-01	.127898E-01	.388692E-01	.701574E-01
.700000	.174111E-01	.174111E-01	.173994E-01	.453479E-01	.697973E-01
.800000	.227454E-01	.227454E-01	.226977E-01	.527835E-01	.693557E-01
.900000	.287933E-01	.287933E-01	.285938E-01	.596701E-01	.688636E-01
1.000000	.355558E-01	.355558E-01	.352970E-01	.665022E-01	.683211E-01
1.100000	.420340E-01	.420340E-01	.425944E-01	.732747E-01	.677259E-01
1.200000	.512290E-01	.512296E-01	.505979E-01	.799831E-01	.670835E-01
1.300000	.601420E-01	.601420E-01	.592911E-01	.866231E-01	.663999E-01
1.400000	.697743E-01	.697743E-01	.685922E-01	.931511E-01	.656803E-01
1.500000	.801276E-01	.801276E-01	.785936E-01	.996841E-01	.649300E-01
1.600000	.912034E-01	.912034E-01	.891975E-01	.106100	.641565E-01
1.700000	.103003	.103003	.100006	.112436	.633637E-01
1.800000	.115529	.115529	.112975	.118693	.625656E-01
1.900000	.128783	.128783	.124912	.124869	.617637E-01
2.000000	.142768	.142768	.137809	.130966	.609687E-01
2.100000	.157484	.157484	.151508	.136985	.601897E-01
2.200000	.172935	.172935	.165500	.142929	.594361E-01
2.300000	.189123	.189123	.180930	.148801	.587131E-01
2.400000	.206051	.206051	.196141	.154605	.580463E-01
2.500000	.223721	.223721	.212176	.160348	.574321E-01
2.600000	.242136	.242136	.228779	.166037	.568671E-01
2.700000	.261299	.261299	.245947	.171679	.564243E-01
2.800000	.281214	.281214	.263636	.177285	.560557E-01
2.900000	.301883	.301883	.281042	.182865	.557959E-01
3.000000	.323310	.323310	.300945	.188431	.556590E-01
3.100000	.345499	.345499	.320975	.193997	.556593E-01
3.200000	.368453	.368453	.340973	.199578	.558143E-01
3.300000	.392176	.392176	.360972	.205192	.561393E-01
3.400000	.416672	.416672	.381978	.210857	.566191E-01
3.500000	.441945	.441945	.403937	.216593	.573645E-01
3.600000	.468000	.468000	.425939	.223423	.583020E-01
3.700000	.494840	.494840	.446947	.230372	.594832E-01
3.800000	.522472	.522472	.471963	.234464	.609257E-01
3.900000	.550899	.550899	.496976	.240729	.626513E-01
4.000000	.580126	.580126	.520976	.247197	.646804E-01
4.100000	.610160	.610160	.546976	.253901	.670270E-01
4.200000	.641004	.641004	.572973	.260875	.697491E-01
4.300000	.672665	.672665	.599979	.268158	.728232E-01
4.400000	.705149	.705149	.626978	.275788	.763021E-01
4.500000	.738462	.738462	.654999	.283869	.802056E-01
4.600000	.772609	.772609	.684225	.292265	.845604E-01
4.700000	.807598	.807598	.714046	.301204	.893942E-01
4.800000	.843434	.843434	.745973	.310678	.947356E-01
4.900000	.880125	.880125	.777972	.320739	.100614
5.000000	.917679	.917679	.810972	.331445	.167061

COURBURE=-.657320E-01 RAYON=-15.3297

LANBDH=.000000E+00

Solution

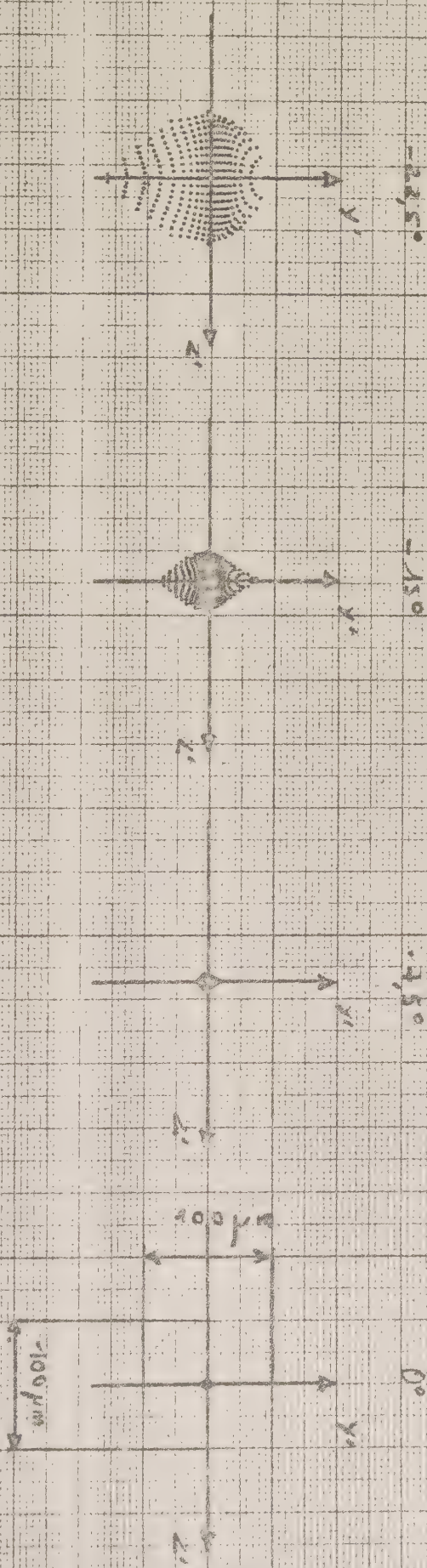
E 2= .613032E-03 E 3= .180359E-04 E 4=-.280727E-08 E 5=-.303752E-13

Y MAX = 5.10000

PAS SUR Y =1.000000E-01 YO= .000000E+00

HAUTEUR	SPHERE	QUADRIQUE	SURFACE	DX/DY	D2X/DY2
.000000E+00	.000000E+00	.000000E+00	.000000E+00	-0.10632	-84.3776
.000000E-01	-.326168E-03	-.326168E-03	-.326167E-03	-.326107E-02	31.0306
.200000	-.130472E-02	-.130472E-02	-.130373E-02	-.977626E-02	-.651519E-01
.300000	-.293577E-02	-.293577E-02	-.293019E-02	-.162705E-01	-.649423E-01
.400000	-.521953E-02	-.521953E-02	-.520316E-02	-.227297E-01	-.645920E-01
.500000	-.815629E-02	-.815629E-02	-.811710E-02	-.291394E-01	-.640954E-01
.600000	-.117464E-01	-.117464E-01	-.116602E-01	-.354845E-01	-.634514E-01
.700000	-.159904E-01	-.159904E-01	-.158411E-01	-.417496E-01	-.626513E-01
.800000	-.208888E-01	-.208888E-01	-.206320E-01	-.479185E-01	-.616888E-01
.900000	-.264422E-01	-.264422E-01	-.260304E-01	-.539741E-01	-.605557E-01
1.00000	-.326513E-01	-.326513E-01	-.320102E-01	-.598983E-01	-.592422E-01
1.10000	-.395169E-01	-.395169E-01	-.385814E-01	-.656721E-01	-.577374E-01
1.20000	-.470399E-01	-.470399E-01	-.457149E-01	-.712749E-01	-.560289E-01
1.30000	-.552213E-01	-.552213E-01	-.533834E-01	-.766853E-01	-.541032E-01
1.40000	-.640622E-01	-.640622E-01	-.615714E-01	-.818798E-01	-.519455E-01
1.50000	-.735636E-01	-.735636E-01	-.702548E-01	-.868338E-01	-.495337E-01
1.60000	-.837269E-01	-.837269E-01	-.794648E-01	-.915206E-01	-.468630E-01
1.70000	-.945533E-01	-.945533E-01	-.889930E-01	-.959119E-01	-.439126E-01
1.80000	-.106044	-.106044	-.989937E-01	-.999771E-01	-.406527E-01
1.90000	-.118201	-.118201	-.109264	-.103684	-.370674E-01
2.00000	-.131026	-.131026	-.120064	-.106997	-.331340E-01
2.10000	-.144520	-.144520	-.131032	-.109880	-.289236E-01
2.20000	-.158685	-.158685	-.142281	-.112293	-.241269E-01
2.30000	-.173523	-.173523	-.153700	-.114193	-.190018E-01
2.40000	-.189037	-.189037	-.165264	-.115536	-.134258E-01
2.50000	-.205227	-.205227	-.176981	-.116273	-.737018E-02
2.60000	-.222096	-.222096	-.188517	-.116353	-.804760E-03
2.70000	-.239647	-.239647	-.200609	-.115723	-.630184E-02
2.80000	-.257882	-.257882	-.211521	-.114325	-.139823E-01
2.90000	-.276804	-.276804	-.222701	-.112098	-.222704E-01
3.00000	-.296414	-.296414	-.233679	-.108978	-.312014E-01
3.10000	-.316716	-.316716	-.244119	-.104896	-.402116E-01
3.20000	-.337713	-.337713	-.254097	-.997825E-01	-.511386E-01
3.30000	-.359407	-.359407	-.263473	-.935604E-01	-.622215E-01
3.40000	-.381801	-.381801	-.272068	-.861504E-01	-.741001E-01
3.50000	-.404899	-.404899	-.279815	-.774688E-01	-.865159E-01
3.60000	-.428704	-.428704	-.286567	-.674276E-01	-.100411
3.70000	-.453220	-.453220	-.292151	-.559346E-01	-.114930
3.80000	-.478449	-.478449	-.296440	-.428928E-01	-.130418
3.90000	-.504395	-.504395	-.299110	-.282008E-01	-.146920
4.00000	-.531063	-.531063	-.300116	-.117523E-01	-.164484
4.10000	-.558456	-.558456	-.299119	-.656364E-02	-.183160
4.20000	-.586578	-.586578	-.297043	-.268632E-01	-.202990
4.30000	-.615433	-.615433	-.292166	-.492674E-01	-.224042
4.40000	-.645026	-.645026	-.284776	-.739027E-01	-.246353
4.50000	-.675361	-.675361	-.274536	-.100901	-.269581
4.60000	-.706443	-.706443	-.261346	-.130399	-.294991
4.70000	-.738276	-.738276	-.245392	-.162540	-.321408
4.80000	-.770866	-.770866	-.225135	-.197472	-.349320
4.90000	-.804217	-.804217	-.202110	-.235345	-.378774
5.00000	-.838336	-.838336	-.174107	-.276332	-.409829

ETENDUE GEOMETRIQUE DE LA TACHE DE DIFFUSION SUR LA RETINE
POUR DIFFERENTES INCIDENCES



Diamètre de la pupille = 6 mm

Coin collé sur l'œil - isolé en A

Cristallin artificiel : Solution B

$$R_3 = 22,778 \text{ mm}$$

$$R_4 = -10,957 \text{ mm}$$

$$n_3 = 1,49471$$

$$S_3 \ S_4 = 3,0 \text{ mm}$$

Equation de la surface 3

$$X = \frac{Y^2}{2 \times 22,778} + (0,566563 \cdot 10^{-3} \times Y^4) + (0,281948 \cdot 10^{-4} \times Y^6) + (0,228156 \cdot 10^{-5} \times Y^8) + (0,879888 \cdot 10^{-7} \times Y^{10})$$

Equation de la surface 4

$$X = \frac{Y^2}{2 \times (-10,957)} + (0,334009 \cdot 10^{-3} \times Y^4) + (0,613661 \cdot 10^{-4} \times Y^6) + (-0,630743 \cdot 10^{-5} \times Y^8) + (0,281159 \cdot 10^{-6} \times Y^{10})$$

Section B

COURBURE= .459021E-01 RAYON= 22.1700 LAMBDA= .800630E+00

E 2=-.566563E-03 E 3= .281948E-04 E 4=-.20156E-03 E 5= .870741E-03

Y MAX = 5.10000 PAS SUR Y = 1.000000E- YD= .000000E+00

HAUTEUR Y_3	SPHERE	QUADRIQUE	SURFACE X_3	DX/DY	D2X/DY2
.000000E+00	.000000E+00	.000000E+00	.000000E+00	.000000E+00	.000000E+00
.000000E-01	.219512E-03	.219512E-03	.219417E-03	.219455E-02	.219455E-01
.200000	.878059E-03	.878059E-03	.877112E-03	.857599E-02	.430244E-01
.300000	.197503E-02	.197503E-02	.197112E-02	.196120E-01	.430244E-01
.400000	.351244E-02	.351244E-02	.349812E-02	.152694E-01	.432988E-01
.500000	.548842E-02	.548842E-02	.545312E-02	.195740E-01	.428459E-01
.600000	.790375E-02	.790375E-02	.783112E-02	.237816E-01	.422759E-01
.700000	.107586E-01	.107586E-01	.106212E-01	.279411E-01	.415953E-01
.800000	.140536E-01	.140536E-01	.138212E-01	.320325E-01	.408188E-01
.900000	.177873E-01	.177873E-01	.174312E-01	.360165E-01	.399390E-01
1.000000	.219616E-01	.219616E-01	.214212E-01	.399147E-01	.389824E-01
1.100000	.265763E-01	.265763E-01	.257912E-01	.437898E-01	.379511E-01
1.200000	.316315E-01	.316315E-01	.305312E-01	.473952E-01	.368533E-01
1.300000	.371275E-01	.371275E-01	.353212E-01	.508649E-01	.356073E-01
1.400000	.430648E-01	.430648E-01	.410512E-01	.541136E-01	.344871E-01
1.500000	.494435E-01	.494435E-01	.468412E-01	.573263E-01	.332267E-01
1.600000	.562642E-01	.562642E-01	.529312E-01	.609281E-01	.319177E-01
1.700000	.635271E-01	.635271E-01	.593312E-01	.639841E-01	.305599E-01
1.800000	.712328E-01	.712328E-01	.660212E-01	.668992E-01	.291516E-01
1.900000	.793816E-01	.793816E-01	.729910E-01	.696682E-01	.276903E-01
2.000000	.879741E-01	.879741E-01	.802112E-01	.722856E-01	.261731E-01
2.100000	.970107E-01	.970107E-01	.876911E-01	.747454E-01	.245987E-01
2.200000	.106492	.106492	.953912E-01	.770422E-01	.229683E-01
2.300000	.116419	.116419	.103313	.791711E-01	.212894E-01
2.400000	.126791	.126791	.111413	.811284E-01	.195732E-01
2.500000	.137610	.137610	.119720	.829132E-01	.178482E-01
2.600000	.148876	.148876	.128172	.845286E-01	.161533E-01
2.700000	.160589	.160589	.136771	.859836E-01	.145498E-01
2.800000	.172751	.172751	.145513	.872952E-01	.131226E-01
2.900000	.185363	.185363	.154313	.884948E-01	.119897E-01
3.000000	.198424	.198424	.163313	.896256E-01	.111308E-01
3.100000	.211936	.211936	.172338	.907541E-01	.112843E-01
3.200000	.225899	.225899	.181343	.918721E-01	.121799E-01
3.300000	.240315	.240315	.190413	.929848E-01	.143273E-01
3.400000	.255184	.255184	.200417	.952187E-01	.181392E-01
3.500000	.270507	.270507	.210211	.976310E-01	.241232E-01
3.600000	.286285	.286285	.220338	.100921	.328973E-01
3.700000	.302519	.302519	.230517	.105441	.452661E-01
3.800000	.319210	.319210	.240711	.110635	.619403E-01
3.900000	.336359	.336359	.250913	.120051	.841575E-01
4.000000	.353967	.353967	.267112	.131361	.113102
4.100000	.372035	.372035	.281713	.146385	.153293
4.200000	.390565	.390565	.298412	.166110	.197256
4.300000	.409557	.409557	.317513	.191724	.257104
4.400000	.429012	.429012	.340612	.224838	.329140
4.500000	.448933	.448933	.366610	.266526	.418682
4.600000	.469319	.469319	.398613	.319060	.528286
4.700000	.490173	.490173	.437111	.385449	.660834
4.800000	.511495	.511495	.482113	.467490	.824407
4.900000	.533287	.533287	.540113	.568612	1.011123
5.000000	.555551	.555551	.610113	.692434	1.23626

data B

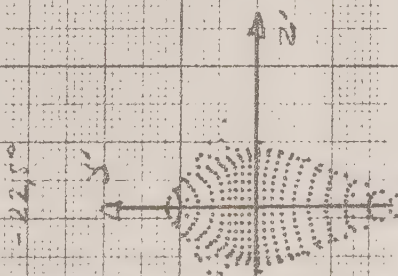
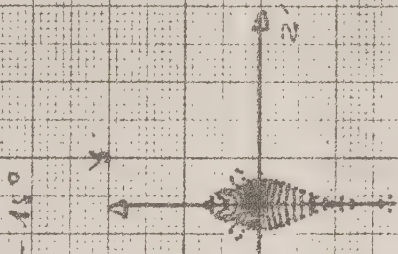
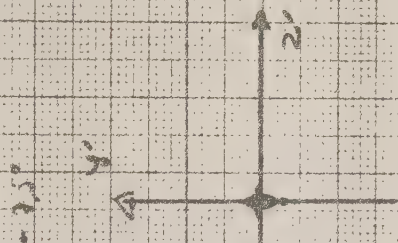
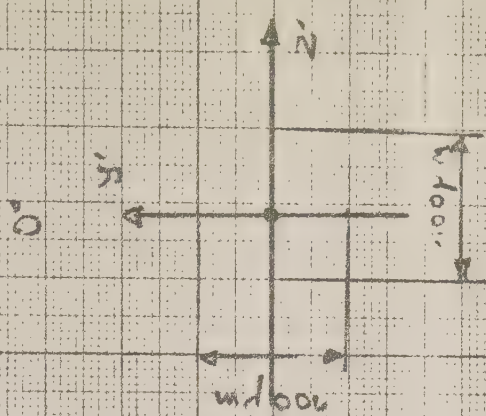
COURBURE=-.912682E-01 RAYON=-10.2557 HMBDA= .000000E+00

E 2= .334009E-03 E 3= .613661E-04 E 4=-.630743E-05 E 5= .281159E-06

Y MAX = 5.10000 PAS SUR Y =1.000000E-01 YO= .000000E+00

HAUTEUR Y4	SPHERE	QUADRIQUE	SURFACE X4	DX/DY	D2X/DY2
.000000E+00	.000000E+00	.000000E+00	.000000E+00	-6.16024	-67.9208
.000000E-01	-.456351E-03	-.456351E-03	-.456317E-03	-.456317E-02	60.9568
.200000	-.182552E-02	-.182552E-02	-.182457E-02	-.136866E-01	-.512344E-01
.300000	-.410784E-02	-.410784E-02	-.410507E-02	-.228611E-01	-.511451E-01
.400000	-.730389E-02	-.730389E-02	-.729507E-02	-.319000E-01	-.905692E-01
.500000	-.114145E-01	-.114145E-01	-.113927E-01	-.409757E-01	-.907565E-01
.600000	-.164406E-01	-.164406E-01	-.163940E-01	-.500190E-01	-.904335E-01
.700000	-.223836E-01	-.223836E-01	-.222960E-01	-.590195E-01	-.900045E-01
.800000	-.292449E-01	-.292449E-01	-.290938E-01	-.679647E-01	-.894527E-01
.900000	-.370262E-01	-.370262E-01	-.367770E-01	-.768406E-01	-.887589E-01
1.00000	-.457295E-01	-.457295E-01	-.453407E-01	-.856314E-01	-.879077E-01
1.10000	-.553571E-01	-.553571E-01	-.547727E-01	-.943198E-01	-.868848E-01
1.20000	-.659114E-01	-.659114E-01	-.650607E-01	-.1.02387	-.856755E-01
1.30000	-.773950E-01	-.773950E-01	-.761927E-01	-.1.11215	-.842758E-01
1.40000	-.898109E-01	-.898109E-01	-.881507E-01	-.1.19583	-.826805E-01
1.50000	-.1.03162	-.1.03162	-.1.00918	-.1.27672	-.808922E-01
1.60000	-.1.17453	-.1.17453	-.1.14474	-.1.35564	-.789175E-01
1.70000	-.1.32686	-.1.32686	-.1.28797	-.1.43241	-.767672E-01
1.80000	-.1.48866	-.1.48866	-.1.43667	-.1.50686	-.744547E-01
1.90000	-.1.65997	-.1.65997	-.1.59697	-.1.57885	-.719937E-01
2.00000	-.1.84093	-.1.84093	-.1.76138	-.1.64825	-.693927E-01
2.10000	-.2.03129	-.2.03129	-.1.93297	-.1.71490	-.666549E-01
2.20000	-.2.23141	-.2.23141	-.2.11074	-.1.77867	-.637673E-01
2.30000	-.2.44124	-.2.44124	-.2.29467	-.1.83936	-.606954E-01
2.40000	-.2.66083	-.2.66083	-.2.48435	-.1.89674	-.573732E-01
2.50000	-.2.89025	-.2.89025	-.2.67937	-.1.95043	-.536919E-01
2.60000	-.3.12956	-.3.12956	-.2.87937	-.1.99992	-.494853E-01
2.70000	-.3.37882	-.3.37882	-.3.08384	-.2.04443	-.445164E-01
2.80000	-.3.63811	-.3.63811	-.3.29217	-.2.08299	-.384539E-01
2.90000	-.3.90750	-.3.90750	-.3.50347	-.2.11474	-.308544E-01
3.00000	-.4.18707	-.4.18707	-.3.71693	-.2.13488	-.211362E-01
3.10000	-.4.47690	-.4.47690	-.3.93137	-.2.14343	-.855026E-02
3.20000	-.4.77707	-.4.77707	-.4.14487	-.2.13958	.705133E-02
3.30000	-.5.08767	-.5.08767	-.4.35557	-.2.10632	.292519E-01
3.40000	-.5.40881	-.5.40881	-.4.56677	-.2.04921	.571100E-01
3.50000	-.5.74056	-.5.74056	-.4.75677	-.1.95681	.932075E-01
3.60000	-.6.08384	-.6.08384	-.4.93767	-.1.81031	.139094
3.70000	-.6.43636	-.6.43636	-.5.09937	-.1.61716	.199150
3.80000	-.6.80061	-.6.80061	-.5.23377	-.1.34252	.274640
3.90000	-.7.17597	-.7.17597	-.5.33877	-.1.07135E-01	.370730
4.00000	-.7.56244	-.7.56244	-.5.41797	-.883896E-01	.488039
4.10000	-.7.96026	-.7.96026	-.5.46477	-.1.53601E-01	.636757
4.20000	-.8.36952	-.8.36952	-.5.46677	-.972156E-01	.819257
4.30000	-.8.79035	-.8.79035	-.5.40527	.201026	1.04310
4.40000	-.9.22294	-.9.22294	-.5.27277	.303107	1.31581
4.50000	-.9.66739	-.9.66739	-.5.03347	.497725	1.64618
4.60000	-1.01239	-1.01239	-.4.63277	.702141	2.04416
4.70000	-1.05926	-1.05926	-.4.07967	.954050	2.53181
4.80000	-1.10737	-1.10737	-.3.31477	1.26623	3.09976
4.90000	-1.15673	-1.15673	-.2.34897E-01	1.69970	3.76460
5.00000	-1.20738	-1.20738	-.1.24207	2.39568	4.56287

ETENDUE GEOMETRIQUE DE LA TACHE DE DIFFUSION SUR LA RETINE POUR DIFFERENTES INCIDENCES

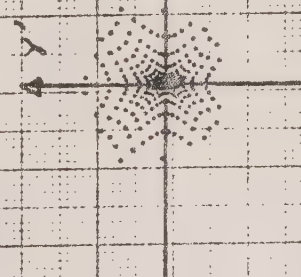


Diamètre de la pupille = 8 mm

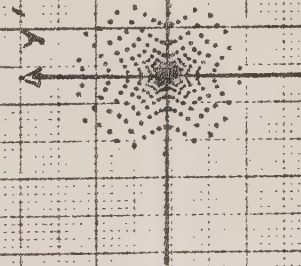
Cristallin artificiel isolé B.

ETENDUE GEOMETRIQUE DE LA TACHE DE DIFFUSION SUR LA RETINE POUR DIFFERENTES INCIDENCES

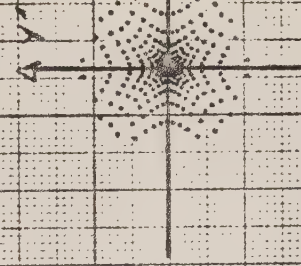
-22,5°



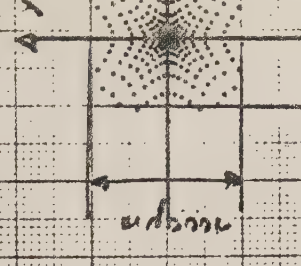
-15°



-7,5°



0°



1000 μm

Diamètre de la pupille : 8 mm

Oeil schématisé

REFERENCES

- (1) Listing. Zur Dioptrik d. Auges, in Wagner's Handwörterbuch d. Physiologie, Braunschweig, 4, 451 (1853).
- (2) HELMHOLTZ, H.V. (1967). Optique physiologique. Texte choisi et traduit par Y. Le Grand. E.d. Desroches. Paris.
- (3) Gullstrand, Einführung in die Methoden der Dioptrik des Auges des Menschen (Leipzig, 1911).
- (4) Y. Le Grand, Optique physiologique. E.d. de la Rev. d'opt., Paris, (1965).
- (5) Girard, A., Calcul automatique en optique Géométrique, Rev. opt. (Theor. instrum) 37, 225-241, 397-424 (1958).
- (6) HOURNAU A. : Problèmes fonctionnels de l'aphaqué unilatérale chez l'enfant. Thèse Bordeaux 1970.
- (7) RIDLEY H., DALLAS N.L., RUBEN M., CHOYCE D.P. : Report on seminars. Recent trendstrends in prosthetics, implant and contact lenses. Trans. ophthal. Soc. U.K. 90, 231-215, 1970.
- (8) STRAMPELLI Ann. ottal., 80, 75 (1954).
- (9) OSHER M.S. : Technique with the Copeland intra ocular lens. Contact intraocul. Lens med. J., 1978, 4, 3, 111-113.
- (10) BINKHORST C.C. Intraocular lens power. Trans. Amer. Acad. ophthal. otolaryng. 1976, 81, n° 1, 70-79.
- (11) Worst. J.G.F. : Complication, Complication factors and adverse conditions in lens implantation surgery. Trans. Amer. Acad. ophthal. otolaryng. 1976-81. 1.105-117.
- (12) FEDEROV (N.), KOLINKO (A.J.) et KOLINKO (A.I.). -estimation of optical power of the intra-ocular lens. vestn. oftal. (Mock.), 1967, 80, 27-31 mit engl. Zus. Fassg.
- (13) COLENBRANDER : calculation of the power of an iris clip lens for distant vision. Br.J. ophthalmol 57 : 735, 1973.
- (14) GERNET (H.), OSTHOLT (H.) et WERNER (H.) ; -L'évaluation pré-opératoire des cristallins artificiels intra-oculaires. Bull. Mem. Soc. franc. optal., 78^e Congrès, 1871.

- (15) Burcher J. "Les combinaisons optiques, pratique des calculs" Paris (1967).
- (16) Baker, J.G. Procedures in automatic optical design, Tech. Rept. N°11, pp. 73-201.
- (17) Baker, J.G. Procedures in automatic optical design, Tech. Rept. N°6, pp. 8-16.
- (18) Wachendorf, F.; Die Bestimmung eines optimalen linsensystems, optik 12, 329-340 (1955).
- (19) Black, G., Use of electronic digital Computers in optical design, Nature 175, 164-165 (1955).
- (20) Black, G., On the automatic design of optical systems, Proc. phys. Soc. (London) B68, 729-736 (1955)
- (21) Black, G., Automatic lens design, in "Optical Design With Digital Computers. Proceedings of a Symposium." Technical Optics Section, Imperial College of Science and Technology, London, 1956.
- (22) Hopkins, H.H., Wave Theory of aberrations, Oxford Univ. Press, (Clarendon), London, 1950.
- (23) Feder, D.P., Automatic lens design with a high speed Computer, J. Opt. Soc. Am. 52, 177-183 (1962).
- (24) Crockett, J.B., and chernoff, H.? Grudient methods of maximization, Pacific J. Math. 5, 33-50 (1950).
- (25) Feder, D.P., Calculation of an optical merit function, J. Opt. Soc. Am. 47, 913-925 (1957).
- (26) Feder, K.P., Conrady's chromatic condition, J. Res. NBS 52, 43-49 (1954).
- (27) Chertien H. "Calcul des combinaisons optiques", Paris (1959)
- (28) Meiron, J., Automatic lens design by the least squares method, J. Op. Soc. Am. 49, 293-298 (1959).
- (29) Hopkins, R.E., and Spencer, G., Creative thinking and computing machines in optical design, J. Opt. Soc. Am. 52, 172-176 (1962).
- (30) Hennessy, W.P., and Spencer, G.H., Automatic correction of first and third-order aberrations, J. Opt. Soc. Am. 50, 494 (1960).
- (31) Hopkins, R.E., Mc Carthy, C.A., and Walters, R., Automatic correction of third-order aberration, J. Opt. Soc. Am. 45, 363-365 (1955).
- (32) -R. DELTHEIL, Erreurs et moindres carrés, éd. Gauthier-Villars, Paris, 1930.

N° d'ordre : 348

Jury : MM. J.-Ch. Viénot	Président
J. Royer	
J. Bulaboïs	Examineurs
J. Duvernoy	

Vu et permis d'imprimer,
Pour le Président de l'Université,
Le Doyen de la Faculté des Sciences
et des Techniques

J. BULABOIS
Besançon, le 20 octobre 1980

